

Sledování stavu atmosféry s využitím dat družice Sentinel 5P

Air Quality Monitoring using Satellite Sentinel 5P Data

Tomáš Michalík

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Lucie Orlíková, Ph.D.

Ostrava 2021

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Hornicko-geologická fakulta
Katedra geoinformatiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Tomáš Michalík**

Studijní program: B1316 Geodézie, kartografie a geoinformatika

Studijní obor: 3646R006 Geoinformatika

Téma: Sledování stavu atmosféry s využitím dat družice Sentinel 5P
Air Quality Monitoring using Satellite Sentinel 5P Data

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cíle práce:

1. Seznámení se s misí Copernicus a družicí Sentinel 5P (parametry, využití, přístup)
2. Rešerše literárních zdrojů a zhodnocení současných metod pro získávání informací o stavu atmosféry
3. Navržení vhodného postupu a zpracování družicových dat pro vybranou oblast
4. Porovnání situace během různých ročních období
5. Výsledky a vyhodnocení

Rozsah grafických prací:

dle potřeby

Rozsah původní zprávy:

35 - 50 normostran textu

Formální náležitosti bakalářské práce stanoví směrnice děkana HGF HGF_SME_15_001 Pokyny pro zpracování závěrečných prací, zveřejněná na webových stránkách fakulty - <https://dokumenty.vsb.cz/docs/files/cs/06b200b0-9642-452d-b50d-d161399b2be7>.

Seznam doporučené odborné literatury:

- Halounová, L., Pavelka, K. 2008. Dálkový průzkum Země. Katedra mapování a kartografie Fsv ČVUT, Praha. ISBN: 978-80-01-03124-7.
- Dobrovolný, P. 1998. Dálkový průzkum Země: digitální zpracování obrazu. Brno, Masarykova univerzita. ISBN 80-210-1812-7.
- Marzano, F.S., Visconti, G.: Remote Sensing of Atmosphere and Ocean from Space: Models, Instruments and Techniques. ISBN 13: 9780306481505

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lucie Orliková, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2020

Datum odevzdání: 30.04.2021

doc. Ing. Igor Ivan, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Vladimír Slivka, CSc., dr.h.c.
děkan fakulty

Prohlášení autora bakalářské práce

- Celou bakalářskou práci včetně příloh, jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu. Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a §60 – školní dílo.

- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečné, ke své vnitřní potřebě, bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).

- Souhlasím s tím, že jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé bakalářské práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

- Souhlasím s tím, že bakalářská práce je licencována pod Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported licencí. Pro zobrazení kopie této licence, je možno navštívit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu o komerční využití z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.

- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu komerčnímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí mé bakalářské práce Ing. Lucii Orlíkové, Ph.D. za cenné rady, doporučení a průběžnou kontrolu při vypracovávání bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu během celého studia.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá sledování stavu atmosféry prostřednictvím dat ze družice Sentinel-5P. V teoretické části byl obecně popsán dálkový průzkum Země, program Copernicus a družice, které jsou využívány v rámci této mise. V práci jsou také popsány charakteristiky jednotlivých znečišťujících plynů. Praktická část obsahuje popis práce v softwaru VISAN a porovnání znečištění ovzduší zejména oxidem dusičitým ve střední Evropě a České republice a pohraniční oblasti Polska s ČR za různá roční období. Výsledkem práce byly mapové výstupy a porovnání průměrných koncentrací škodlivých plynů ve státech střední Evropy.

Klíčová slova: Sentinel-5P; Atmosféra; kvalita ovzduší; Copernicus

Abstract

This bachelor thesis deals with air quality monitoring using data from satellite Sentinel-5P. In theoretical part was generally described remote sensing, program Copernicus and satellites which are used as part of this mission. Aswell there are described characteristics of gases pollutants. Practical part contains describe of the VISAN software and comparison of air pollution in central Europe and Czech republic and border part of Poland for different seasons, especially for nitrogen dioxide. Results are map outputs and comparison of average concentrations of pollutant gases for states in central Europe.

Key words: Sentinel-5P; Atmosphere; Air quality; Copernicus

1.	ÚVOD.....	9
2.	TEORETICKÁ ČÁST.....	10
2.1.	DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ	10
	<i>Elektromagnetické spektrum</i>	<i>10</i>
2.2.	ZNEČIŠTĚNÍ ATMOSFÉRY	11
	<i>REZZO</i>	<i>12</i>
	<i>Skleníkový efekt</i>	<i>13</i>
	<i>Oxid uhličitý CO₂</i>	<i>13</i>
	<i>Aerosoly a suspendované částice PM₁₀ a PM_{2,5}.....</i>	<i>14</i>
	<i>Oxid siřičitý SO₂.....</i>	<i>14</i>
	<i>Oxidy dusičitý NO₂.....</i>	<i>15</i>
	<i>Ozon O₃.....</i>	<i>15</i>
	<i>Formaldehyd HCHO.....</i>	<i>15</i>
	<i>Oxid uhelnatý CO.....</i>	<i>16</i>
	<i>Methan CH₄.....</i>	<i>16</i>
3.	MISE COPERNICUS A DRUŽICE SENTINEL-5P	17
3.1.	PROGRAM COPERNICUS.....	17
3.2.	POSKYTOVANÉ SLUŽBY	17
	<i>Monitorování území</i>	<i>17</i>
	<i>Monitorování atmosféry.....</i>	<i>17</i>
	<i>Monitorování mořského prostředí.....</i>	<i>18</i>
	<i>Monitorování změny klimatu.....</i>	<i>18</i>
	<i>Monitorování v oblasti bezpečnosti.....</i>	<i>18</i>
	<i>Monitorování krizového řízení</i>	<i>19</i>
3.3.	INFRASTRUKTURA	19
	<i>Sentinel-1</i>	<i>20</i>
	<i>Sentinel-2</i>	<i>20</i>
	<i>Sentinel-3</i>	<i>20</i>
	<i>Sentinel-4</i>	<i>21</i>
	<i>Sentinel-5</i>	<i>21</i>
	<i>Sentinel-6</i>	<i>21</i>
	<i>Sentinel-5P</i>	<i>21</i>
4.	REŠERŠE LITERÁRNÍCH ZDROJŮ A ZHODNOCENÍ SOUČASNÝCH METOD	24
4.1.	TYPY MONITOROVACÍCH STANIC ČHMÚ	24

5. NAVRŽENÍ VHODNÉHO POSTUPU A ZPRACOVÁNÍ DRUŽICOVÝCH DAT PRO VYBRANOU OBLAST	31
5.1. POPIS SOFTWARE VISAN	31
<i>Instalace VISANu</i>	<i>31</i>
<i>Ukázka prostředí programového produktu VISAN.....</i>	<i>32</i>
5.2. POPIS PRACOVNÍHO POSTUPU PŘI VYTVÁŘENÍ VIZUALIZACE	35
6. VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ V JEDNOTLIVÝCH ROČNÍCH OBDOBÍCH	37
6.1. OXID DUSIČITÝ NO ₂	38
<i>Střední Evropa</i>	<i>38</i>
<i>Porovnání oblasti ČR a části Polska.....</i>	<i>40</i>
6.2. OXID UHLÍKATÝ CO	46
6.3. OXID SIŘIČITÝ SO ₂	48
6.4. METHAN CH ₄	49
6.5. FORMALDEHYD HCHO	50
6.6. INDEX ABSORPČNÍHO AEROSOLU	51
7. ZÁVĚR	52
8. SEZNAM ZKRATEK.....	53
9. SEZNAM OBRÁZKŮ	56
10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	58

1. ÚVOD

V dnešní době je znečištění ovzduší velmi diskutovaným tématem. Škodlivé plyny v atmosféře souvisí se zvyšováním koncentrací skleníkových plynů způsobující skleníkový efekt, který vede ke zvyšování průměrné teploty na planetě Zemi a celkové změně klimatu. Způsobuje tání ledovců, zvyšování hladiny oceánu. Následkem těchto faktů mohou v některých částech světa vznikat extrémní povětrnostní podmínky. V Evropě to můžeme pozorovat na stále delších a častějších obdobích sucha. Jiné regiony se zase potýkají s častějšími lesními požáry. Odhaduje se, že tento trend změny klimatu bude v následujících desetiletích pokračovat, a to ještě intenzivnější formou.

Cílem mé bakalářské práce je sledovat stav atmosféry za pomoci dat z družice Sentinel-5P. V práci bude popsána problematika znečištění ovzduší. Rešeršní část bude věnována seznámení s principy sledování znečištění pomocí dat z výše zmíněné družice. Jedním z úkolů je také seznámit se s programem Copernicus, tudíž v práci bude tento program popsán včetně jednotlivých služeb, které poskytuje. Další část této kapitoly bude věnována popisu dalších družic spadajících do programu Copernicus. V praktické části se pokusím podrobněji navrhnout a popsat postup zpracování dat pomocí balíčku nástrojů Atmospheric toolbox. Nakonec takto zpracovaná data budou porovnány v rámci jednotlivých ročních období. Podrobněji se zaměřím na oxid dusičitý v oblasti České republiky a části Polska, která sousedí s ČR.

2. TEORETICKÁ ČÁST

Následující kapitola se bude věnovat teorii, jako je vysvětlení základních principů dálkového průzkumu Země, znečištění atmosféry a podrobnějšímu popisu jednotlivých polutantů a jejich vzniku.

2.1. Dálkový průzkum Země

Dálkový průzkum země (DPZ) je druh získávání informací o objektech a jevech na Zemi bez nutnosti přímého kontaktu s pozorovanými jevy a objekty. Data jsou pořizována vzdáleně s využitím elektromagnetického záření. Využívá se pasivního a aktivního elektromagnetického záření. V případě prvního jmenovaného je využíváno záření ze Slunce a Země. Aktivní záření chápeme jako záření, které vysílá měřicí aparatura (toho využívají např. radary). Metoda DPZ spočívá v měření intenzity odraženého záření, různé materiály reagují jinak v jednotlivých částech spektra. Síla odraženého záření závisí na tvaru objektu, povrchu a chemickém složení. Snímače zpracovávají odražené (Sluneční) nebo emitované záření (záření vylučované přímo Zemí). Pro dálkový průzkum se používá hned několik typů nosičů. Mohou to být družice, letadla, vrtulníky, balóny nebo třeba drony. Největší výhodou DPZ je, že umožňuje získat data v relativně krátkém čase a na velké ploše. Data mohou být monochromatická, což jsou data snímána v jedné vlnové délce. Nebo panchromatická, kdy snímání probíhá ve viditelné části spektra. Další způsob je použití více vlnových délek při snímání najednou, takto vzniklá data se nazývají multispektrální nebo hyperspektrální. V tomto případě snímání probíhá i v několika desítkách a více vlnových délkách naráz (viditelné, infračervené, blízké infračervené, ultrafialové, v případě radarů mikrovlnné záření atd.). Družice sbírají data o větších plochách s menším rozlišením a v pravidelných intervalech, tudíž je možné porovnávat snímky v různých časech. Naopak data pořízená z letadla nebo dronu obsahují informace o menší ploše, ale zato s větším rozlišením. (Halounová, 2005; Dobrovolný, 1998)

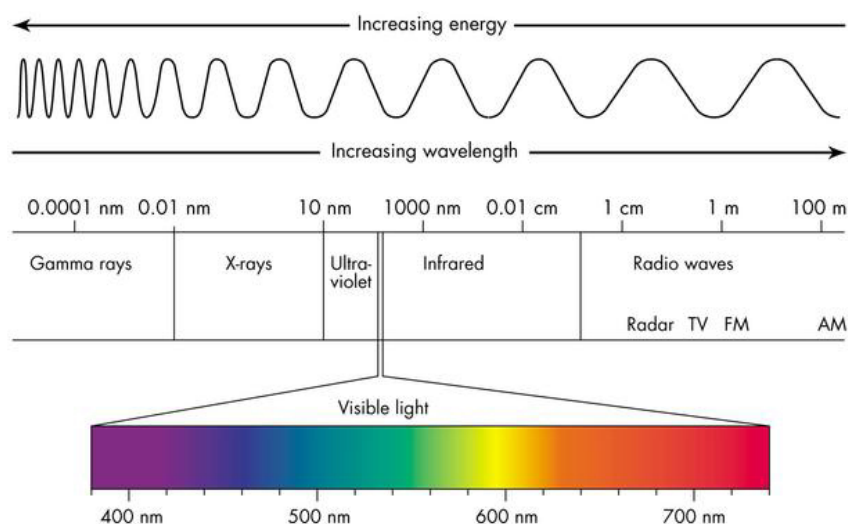
Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické spektrum si můžeme představit jako rozsah vlnových délek, které jsou rozděleny do několika kategorií. Zdrojem elektromagnetického záření jsou elektrony přecházející mezi svými dráhami kolem atomů a tím dochází ke změně celkové energie

elektronů, to je doprovázeno vytvářením elektromagnetického záření. Elektromagnetické záření je tvořeno vlnami o určité vlnové délce, která určuje frekvenci. Elektromagnetické spektrum se dělí na několik částí. V dálkovém průzkumu Země se využívá hlavně viditelné část spektra, které se nachází v intervalu 0,40 až 0,70 μm , infračervené s vlnovou délkou 0,7 až 25 μm a mikrovlnné záření, které má rozsah 1 mm až 1 m. Mezi infračerveným a mikrovlnným se nachází tzv. submilimetrové vlny (25 μm – 1 mm). Tato část se nepoužívá kvůli vysoké absorpci CO_2 . (Kolář, 1997)

Tabulka 1 - Rozdělení infračerveného spektra. (Kolář & Halounová, & Pavelka, 1997)

Rozdělení infračerveného spektra	Vlnový rozsah
Blízké infračervené (NIR – near infrared)	0,72 až 1,3 μm
Střední infračervené (MIR – mid infrared)	1,3 až 4 μm
Daleké infračervené (TIR – thermal infrared)	4 až 25 μm



obrázek 1 - Elektromagnetické spektrum. Zdroj: <https://www.cyberphysics.co.uk/topics/radioact/Radio/EMSpectrumcolor.jpg>

2.2. Znečištění atmosféry

Zemská atmosféra se skládá z mnoha různých plynů, kapalných i pevných částic. Procentuální zastoupení plynů v atmosféře je do výšky 100 km velice podobné. Až na oxid uhličitý (CO_2), jehož koncentrace se mění i v prostoru i v čase. Oxid uhličitý patří mezi plyny, ze kterých se skládá atmosféra, tudíž není považován za znečišťující látku. Zároveň je však jeho

koncentrace ostře sledovaná, protože je to jeden z plynů zapříčiňující skleníkový efekt. Atmosféra je složená z 78 % dusíku, 21 % kyslíku, necelé 1 % argonu a zbytek jsou ostatní plyny, mezi které také patří CO₂. (Andreovský, 2013)

Emise – emise je koncentrace látky, která je emitovaná (vypuštěná) do okolí z komínu elektráren, továren nebo automobilů.

Imise – Imise se nazývá koncentrace znečišťující látky, která už je obsažená v ovzduší.

V České republice určuje imisní limity pro znečištění ovzduší Český hydrometeorologický úřad. Imisní limity pro ochranu zdraví a maximální počet jejich překročení jsou vyobrazeny na následující tabulce.

Tabulka 2 - Imisní limity pro ochranu zdraví a maximálním počtem jejich překročení. Stanoveno Českým hydrometeorologickým úřadem.

Znečišťující látka	Doba průměrování	imisní limit [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]
SO ₂	1 hodina	350, max. 24x za rok
	24 hodin	125, max. 24x za rok
NO ₂	1 Hodina	200, max. 18x za rok
	Kalendářní rok	40
PM ₁₀	24 Hodin	50, max. 35x za rok
	Kalendářní rok	40
PM _{2,5}	Kalendářní rok	20, (nově od roku 2020)
Pb	Kalendářní rok	0,5
CO	maximální denní 8hod. klouzavý průměr	10 000
Benzen	Kalendářní rok	5
Troposférický O ₃	maximální denní 8hod. klouzavý průměr	120, max. 25x, průměr za 3 roky

REZZO

REZZO je zkratka pro registr emisí a zdrojů a znečištění ovzduší. Slouží jako evidence zdrojů znečišťujících látek. Existují celkem čtyři kategorie. Zdroje znečištění se dělí ještě na stacionární a mobilní. Stacionární spadají do prvních tří kategorií a mobilní zdroje znečištění patří do čtvrté kategorie REZZO 4.

REZZO 1 – Do první kategorie patří největší zdroje znečištění ovzduší obvykle o tepelném výkonu více jak 5 MW. Jsou to například elektrárny a spalovny. Každý z těchto velkých zdrojů se sleduje individuálně. Každoročně provozovatelé těchto zdrojů odevzdávají formulář o emisích.

REZZO 2 – V druhé kategorii najdeme střední stacionární zdroje. Tyto zařízení mají výkon od 0,2 do 5 MW. Jsou to zařízení, kde probíhají technologické procesy s možností hoření, nebo úniku škodlivých látek. Zde také mohou patřit lomy. Kontrola emisí těchto zařízení probíhá stejně jako v případě REZZO 1.

REZZO 3 – Do třetí kategorie spadají malé stacionární zdroje. Jsou to menší zařízení provádějící spalovací činnost o tepelném výkonu menší než 0,2 MW. Spadají sem skládka paliv, odpadů a domácí topeniště. Emise jsou sledovány hromadně. Odhad emisí pro lokální topeniště se provádí za pomoci informací, které poskytují regionální energetické a teplárenské závody.

REZZO 4 – Zde patří mobilní zdroje znečištění. Jedná se o dopravní prostředky se spalovacími motory. Data o znečištění se získávají z centra dopravního výzkumu.

Skleníkový efekt

Skleníkový efekt je přirozený proces, který udržuje teplotu planety na stabilní hodnotě. V atmosféře jsou obsaženy takzvané skleníkové plyny (oxid uhličitý, metan, oxid dusný, ozon, freony). Tyto plyny dokážou pohlcovat tepelné infračervené záření odražené od povrchu Země. Následkem je ohřev spodní vrstvy atmosféry. O globálním oteplování mluvíme ve chvíli, kdy se vlivem rozvíjejícího průmyslu dostává do atmosféry větší množství výše zmíněných plynů. Následkem toho je pohlceno více infračerveného záření, než je potřeba a teplota se zvyšuje.

Oxid uhličitý CO₂

Společně s metanem tvoří hlavní dvojici skleníkových plynů. Skleníkovému efektu přispívá pohlcováním infračerveného záření. Za běžných podmínek tvoří CO₂ přibližně 0,04 % zemské atmosféry. Antropogenním původem se dostává do atmosféry především spalováním uhlíkových paliv, to zahrnuje veškeré dopravní prostředky na spalovací pohon, průmysl, lokální topeniště a podobně. V přírodě je CO₂ přirozeným zdrojem uhlíku pro život na Zemi. Jedinou přírodní možností redukce toho plynu v atmosféře je fotosyntéza rostlin, avšak kvůli

rozvinutému průmyslu ve světě a snižování vegetační plochy se přirozeně nestíhá koncentrace redukovat. Následkem toho je neustálé zvyšování koncentrace oxidu uhličitého v ovzduší. Odhaduje se, že oxid uhličitý má na skleníkovém efektu asi 24% podíl. (Arnika, 2014)

Aerosoly a suspendované částice PM₁₀ a PM_{2,5}

Při pozemním měření se sleduje polétavý prach neboli pevné částice označovány PM (particulate matter). Od aerosolů se liší tím, že neobsahují kapalné látky, ale pouze pevné částice. Dělí se na jednotlivé skupiny podle velikosti částic PM_{2,5} nebo PM₁₀. Číselný index udává velikost maximální velikost sledovaných částic v μm . Do ovzduší se z velké části dostávají spalováním. V prašném prostředí také hraje roli vliv větru, který prach rozvíří a ten se následně udrží v atmosféře.

Škodlivost pro lidské zdraví se u pevných částic liší jejich velikostí. Čím menší částice, tím jsou pro člověka škodlivější. Částice o velikosti 10 μm jsou schopny proniknout pouze do dýchacích cest. Menší částice do velikosti 2,5 μm se usazují v průdušinkách. Částice o velikosti PM₁ se dostávají do plicních sklípků. Úplně nejmenší částice v řádech nanometrů jsou schopné se dostat až do krevního oběhu. Vystavováním se těmto částicím způsobuje dýchací potíže a plicní choroby. V částicích jsou často obsaženy karcinogenní sloučeniny, které mohou při dlouhodobé pravidelné expozici těmto látkám způsobit rakovinu plic. (Arnika, 2014)

Oxid siřičitý SO₂

Do ovzduší se dostává především spalováním paliv s obsahem síry (například hnědého uhlí) a výrobou kyseliny sírové. Významným přírodním zdrojem je vulkanická činnost a lesní požáry. V ovzduší se mění oxid siřičitý na oxid sírový, který vytváří aerosoly kyseliny sírové. Tím může dojít k poklesu pH pod 4 a vnikají kyselé deště, které škodí vegetaci a znehodnocují kvalitu vody. Také mohou poškozovat materiální věci jako historické památky a stavby. V zimních a podzimních měsících se často objevuje teplotní inverze a v údolích se hromadí škodliviny jako oxidy síry nebo dusíku. Větším koncentracím v těchto měsících také napomáhá vytápění domů uhlím. Vdechování vysoké koncentrace oxidu siřičitého dochází k poškození plic a dýchacích cest. (Arnika, 2014)

Oxidy dusičitý NO₂

Obecně jsou oxidy dusíku označovány jako NO_x. Patří mezi ně oxid dusný, oxid dusnatý, oxid dusičný a dusičitý. Multispektrální přístroj TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument) nacházející se na družici Sentinel-5P sleduje hlavně oxid dusičitý (NO₂), který je i z hlediska lidského zdraví nejvýznamnější. Hlavní zdroje jsou antropogenního původu – emise dopravy, a také jako u SO₂ spalování uhlíkových paliv jako je uhlí nebo topné oleje. Oxidy dusíku se v atmosféře postupně mění na kyselinu dusičnou, která nepříznivě působí na růst rostlin. Oxid dusičitý při reakci s kyslíkem, těkavými organickými látkami a UV záření zvyšuje tvorbu přízemního ozonu. (Andreovský, 2013). Při vdechnutí snadno proniká do plic, kde téměř 60 % absorbuje krev a tím snižuje okysličení krve. (Arnika, 2014)

Ozon O₃

Ozon se dělí na dva druhy v závislosti na tom, kde se nachází. Stratosférický ozon ve výšce 20-30 km nad Zemským povrchem tvoří cca 90-95 % celkového ozonu v ovzduší. Chrání pozemský život před slunečním ultrafialovým zářením. Nad Arktidou a Antarktidou se nachází tzv. ozonové díry, kde je mnohem nižší koncentrace stratosférického ozonu. Troposférický ozon se nachází v nejnižší části atmosféry, tou je troposféra. V těchto výškách (do 10 km nad povrchem) je považován za škodlivou látku. Škodí lidskému zdraví, rostlinám a nepříznivě působí i na některé materiály. Vzniká přenosem ze stratosféry nebo reakcemi oxidu dusíků s těkavými organickými sloučeninami. Největší výskyt je za horkých letních dní, při bezvětří a nejvíce v obydlených a průmyslových oblastech. (Andreovský, 2013). Přízemní ozón dráždí dýchací cesty a způsobuje podráždění očí a bolest hlavy.

Formaldehyd HCHO

Formaldehyd je organická karcinogenní látka přirozeného výskytu. V průmyslu se používá jako surovina k výrobě chemických látek jako jsou lepidla, barvy, laky a pesticidy. Často se vyskytuje v ovzduší vnitřních prostor, protože se vypařuje ze stavebních materiálů, nábytku a koberců, kde je použit jako lepidlo. V atmosféře vzniká oxidací uhlovodíků. Může vznikat při nedokonalém spalování fosilních paliv a odpadů. Přírodním zdrojem formaldehydu

jsou lesní požáry a rozkladné procesy. V ovzduší se přirozeně vyskytuje v koncentracích 10-100 $\mu\text{g.m}^{-3}$ (znečištěný městský vzduch). (Motyka, K., Mikula, P. 2005).

Oxid uhelnatý CO

Oxid uhelnatý vzniká nedokonalým spalováním materiálů obsahujících uhlík. Mezi antropogenní zdroje patří doprava a průmyslové procesy, kde se provádí spalování. Většina tohoto plynu vzniká přírodní cestou – fotochemickými procesy v troposféře, vulkanickou činností, lesními požáry a dalšími přírodními procesy, které jsou doprovázené hořením. V atmosféře je považován za nepřímo působící skleníkový plyn, protože přispívá ke vzniku methanu a přízemního ozonu. (Hůnová, 2004). Nepůsobí přímo na sliznice, je možné jej přijmout pouze vdechováním. Odkysličuje krev a působí na srdce a cévní nervový systém. (Arnika, 2014)

Methan CH₄

Methan patří mezi hlavní skleníkové plyny s vyšším potenciálem způsobovat globální oteplování než CO₂. Zdroje antropogenního původu je například těžba uhlí, ropný průmysl, chov dobytka, zpracování zemního plynu a spalování biomasy. Mezi přírodní zdroje patří biologické procesy, které tvoří až 80 % emisí. Velkým zdrojem jsou například rozkladné procesy v mokřadech. Čím více methanu je v ovzduší, tím více se zvyšuje přírodní produkce dalšího methanu. Například zvyšování teploty na Zemi kvůli globálního oteplování je způsobeno tání permafrostu na Sibiři. Zde se nachází velká ložiska, ze kterých může unikat další methan do ovzduší. Odhaduje se, že během posledních 200 let se koncentrace methanu v atmosféře zdvojnásobila. (Brzezina, 2020)

3. MISE COPERNICUS A DRUŽICE SENTINEL-5P

3.1. Program Copernicus

Program Copernicus byl založen Evropskou unií v roce 2014. Cílem projektu je pozorování zemského povrchu a životního prostředí. Ke sběru dat jsou využívány družice a pozemní stanice a čidla na zemi, ve vzduchu nebo v mořích. Poskytuje volně dostupná data pro širokou veřejnost. Součástí programu jsou informační služby, které najdou uplatnění v mnoha oblastech, od ochrany životního prostředí, přes ochranu obyvatel, až po politická rozhodnutí. Program Copernicus má obrovské ekonomické, společenské a environmentální přínosy. Vedlejší ekonomickou výhodou je vytváření tisíce nových pracovních pozic. Zaměření služeb programu Copernicus je rozděleno do šesti kategorií: Území, atmosféra, bezpečnost, klimatické změny, krizové řízení a mořské prostředí.

3.2. Poskytované služby

Monitorování území

Poskytuje informace o povrchu Země. Sleduje geografické změny v krajině, využití půdy pro zemědělství a ostatní účely. Odvětví sledování území například poskytuje známou datovou vrstvu o krajinném pokryvu a využití území, která se jmenuje Corine Land Cover. Pro území ČR je tato vrstva dostupná ke stažení na portálu INSPIRE. Také sleduje změny ve vegetačním pokryvu a vodním cyklu. Služba je využívána v různých odvětvích jako jsou městské a územní plánování, lesnictví, zemědělství a s tím související bezpečnost potravin, vodní hospodářství. Pomáhá hledat způsoby a možnosti ke snižování uhlíkové stopy a zmírňování změny klimatu.

Monitorování atmosféry

V reálném čase provádí konzistentní sběr dat o složení a znečištění atmosféry. Denně jsou poskytovány informace o složení atmosféry. Sledovány jsou zejména znečišťující a skleníkové plyny jako oxid uhličitý nebo metan. Mezi další sledované patří oxid uhelnatý, oxidované sloučeniny dusíku, oxid siřičitý, ozon (troposférický i stratosférický), UV záření a aerosolové částice. Informace jsou využívány v oblastech životního prostředí, zdraví,

obnovitelných zdrojů energie a v meteorologii. Také poskytuje přesné informace o slunečním záření pro využití sluneční energie. To pomáhá při produkci solární energie.

Monitorování mořského prostředí

Služba se zaměřuje na poskytování dat o mořském a oceánském prostředí, o biochemických a fyzikálních vlastnostech, které jsou důležité pro kontrolu znečištění vod, sledování výšky hladiny a teploty oceánu, což je významný ukazatel změny klimatu na Zemi. Zvyšování teploty oceánu předchází vzniku tropických cyklónu. Sleduje proměnlivost ekosystému pro mořské a oceánské prostředí. Umožňuje lépe přizpůsobit řízení udržitelného rybolovu a ochraňovat tak živé mořské zdroje. Informace se využívají v meteorologii, klimatologii nebo pro námořní bezpečnost. Poskytuje informace větru, proudech, ledovém pokryvu na moři. Slouží také ke zlepšení lodní navigace a může pomáhat při záchranných a pátracích operacích. Každým rokem zveřejňuje zprávu o stavu oceánu kvůli klimatickým změnám.

Monitorování změny klimatu

Sleduje změny v oblasti klimatu, poskytuje spolehlivé informace o minulém stavu, současném stavu klimatu a utváří model pro předpověď budoucího stavu klimatu. Podporuje politiku zaměřenou na zmírňování dopadu na životní prostředí. Služba vychází z výzkumu Světového klimatického výzkumného programu (World Climate Research Programme, WCRP).

Monitorování v oblasti bezpečnosti

Cílem služby v oblasti bezpečnosti je poskytovat informace, které slouží pro řešení bezpečnostní situace v Evropské unii. Pomáhá s predikcí různých krizí. Uplatňuje se v oblasti námořního dohledu a ostrahy hranic. S ostrahou hranic souvisí snaha o snížení tragických nehod ilegálních přistěhovalců, kteří se na vlastní pěst dostávají přes moře. Díky námořnímu dohledu je možné podporovat kontrolu rybolovu a znečištění moře. K tomuto se využívají data z družice Sentinel-1 v kombinaci s dalšími námořními zdroji. Podporuje také vnější činnost Evropské unie. EU podporuje hospodářský rozvoj, lidská práva a demokracii. Cílem Evropské unie je i pomáhat v mezinárodní sféře zemím třetího světa při krizích.

Monitorování krizového řízení

Odvětví krizového řízení operuje v oblasti přírodních katastrof, mimořádných situací způsobených člověkem nebo humanitárních krizí. Skládá se ze dvou složek, mapování a složky včasného varování. Mapovací složka se zabývá celým světem a poskytuje zejména organům pro civilní bezpečnost mapy založené na družicových snímcích. Výstupy jsou digitální i tištěné papírové mapy. Cílem je pomoc při geoprostorových analýzách a rozhodovacích procesech v případě nějaké mimořádné situace. Mezi složku včasného varování patří několik služeb:

- Evropský systém informací o povodních EFAS (European Flood Awareness System). Poskytuje informace o probíhajících a přicházejících povodních v Evropě, a to až s deseti denním předstihem.
- Evropský systém informací o lesních požárech EFFIS (European Forest Fire Information System). Tento systém poskytuje jak historické informace o lesních požárech, tak informace o požárech téměř v reálném čase.
- Evropská observatoř pro sledování sucha EDO (European drought observatory). Zveřejňuje důležité informace pro období sucha a pro včasné varování.

Tyto systémy jsou doplněny i o globální verzi, které poskytují informace pro celý svět.

3.3. Infrastruktura

Pro sběr dat jsou využívány dva způsoby pořizování dat, které se vzájemně doplňují. Jsou to družicová data (kosmický segment) a in-situ data (pozemní segment). Do kosmického segmentu patří řada družic Sentinel. První družice byla vypuštěna roku 2014 a nese název Sentinel-1A. Do roku 2030 se plánuje mít na oběžné dráze Země až 20 družic, které budou dodávat data za účelem této mise. Program také využívá již existující infrastruktury vybudované Evropskou vesmírnou agenturou (ESA) a Evropskou organizací pro využívání meteorologických družic (EUMETSAT). Je známých 6 řad družic Sentinel (Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3, Sentinel-4, Sentinel-5 a Sentinel-5P a nově Sentinel-6. Některé jsou párové, což znamená že pro jednu řadu jsou dvě družice na stejné oběžné dráze, ale jsou posunuty o úhlovou vzdálenost 180 stupňů, tudíž jsou na protějšcích stranách Země.

Druhou důležitou součástí je pozemní segment, který poskytuje tzv. in-situ data (tzn. Data, která jsou pořízena přímo na místě). Patří zde síť stanic na povrchu Země, ve vodě nebo ve vzduchu. Měřicí čidla mohou být umístěna na meteorologických balónech, v mořích, březích řek apod. Správu těchto dat zajišťují pro program Copernicus členské státy Evropské unie. Používají se hlavně pro korekci družicových dat nebo jejich pro zpřesnění.

Sentinel-1

Sentinel-1 je případ párové družice, dělí se na Sentinel-1A, který byl vypuštěn roku 2014 a Sentinel-1B, který byl vypuštěn o dva roky později. Po skončení životnosti prvního páru družic budou nahrazeny Sentinelem-1C a D. Provozní životnost je odhadovaná na 7 let. Na palubě využívá radar pracující v pásmu C (5404 MHz). Radarová technologie zvládá pořizovat data za každého počasí nezávisle na oblačnosti, ve dne i v noci. Zaměřuje se na monitorování půdy, vegetace, vody a mořského ledu. Nejvyšší rozlišení je 5x5 m.

Sentinel-2

Sentinel-2 se také skládá ze dvou družic v protilehlé poloze na stejné orbitě. Družice jsou rovněž rozlišeny písmeny A a B. Na palubě nese multispektrální (443 až 2190 nm) optický přístroj s vysokým prostorovým rozlišením. Používá se pro monitorování vegetace, lesních porostů, obsahu chlorofylu v listech a pro tvorbu vegetačních indexů.

Sentinel-3

Sentinel-3 je provozován napůl agenturami ESA a EUMETSAT. Poskytuje multispektrální data o pozorování oceánu a půdy. Mise sentinel-3 je také složená ze dvou Sentinel-3A a Sentinel-3B. Na palubě má několik nástrojů: Ocean and Land Color Instrument pro sledování barvy oceánu a půdy. Sea and Land Surface Temperature Instrument, který slouží pro měření teploty oceánu a půdy. SAR Radar Altimeter, radarová technologie pro přesné stanovení výšky hladiny vodních ploch, velikosti vln, rychlosti větru při povrchu a tloušťky mořského ledu. Microwave Radiometer, který sleduje radiační teplotu a podává data o obsahu atmosférických vodních par a kapalně vody.

Sentinel-4

Družice Sentinel-4 se ještě na oběžné dráze nenachází. Bude pracovat v ultrafialovém, viditelném, a blízkém infračerveném záření. Hlavním úkolem bude sledovat stopové plyny jako oxid dusičitý, ozon, oxid siřičitý, formaldehyd, glyoxal a aerosoly nad Evropou. Družice se bude nacházet v geostacionární poloze, tzn. bude neustále nad stejným místem nad povrchem Země, konkrétně nad Evropou. Bude poskytovat hodinové údaje o kvalitě ovzduší v oblasti troposféry. Jako doplňkové mise budou použity Sentinel-5 a Sentinel-5P pro informace o oxidu uhelnatém, metanu a stratosférickém ozonu. Vypuštění je naplánováno na rok 2023.

Sentinel-5

Jedná se také o družici určenou k monitorování atmosféry. Zahájení provozu se plánuje na rok 2021. Obdobně jako Sentinel-4 a jeho předchůdce Sentinel-5P (Precursor) bude poskytovat data znečištění ovzduší oxidem dusičitým, oxidem siřičitým, ozonem, formaldehydem a aerosoly. Nebude na geostacionární dráze.

Sentinel-6

Sentinel-6 byl vypuštěn ke konci roku 2020. Na misi spolupracuje Evropská unie (ESA a EUMETSAT) a Spojené státy americké (NOAA a NASA). Nejdůležitějším přístrojem na palubě jsou velmi přesné výškoměry pro měření hladiny globální výšky hladiny moří. Topografická data o oceánu jsou důležitá k pochopení distribuce a ukládání tepla, vody a uhlíku. Druhým úkolem je měřit teplotu ve svislých profilech pomocí technologie GNSS Radio-Occultation. Tato metoda umožňuje analyzovat změny teploty a tlaku v troposféře a stratosféře a zefektivnit numerické modely pro předpovědi počasí. Technologie AMR-C, multifrekvenční mikrovlnný radiometr bude sloužit pro korekci a měření vodní páry. (Copernicus, 2021)

Sentinel-5P

Data z této družice budou využívány v bakalářské práci, proto bude Sentinel-5P popsán nejpodrobněji. Družice patří do programu Copernicus zaměřenou na pozorování složení Zemské atmosféry. Sleduje zejména škodlivé plyny jako je metan, formaldehyd, ozón, oxid siřičitý, oxid

dusičitý, oxid uhelnatý a aerosoly. Byl vypuštěn 13. října roku 2017 z Ruského kosmodromu Plesetsk pomocí nosné rakety Rockot. Má nejlepší rozlišení z družic, které sledují ovzduší.

K pozorování atmosféry využívá multispektrální přístroj TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument), který poskytla NSO (Netherlands Space Office). Senzor pracuje v ultrafialovém, viditelném, blízkém a středním infračerveném spektru. Rozlišení u většiny částí spektra je 7 x 7 km. Nachází se na heliosynchronní orbitě ve výšce 824 km nad povrchem Země. Jedno oběhnutí planety trvá 101 minut. Díky širokoúhlému záběru dokáže při jednom přeletu pokrýt pás široký 2600 km na povrchu Země a dokáže tak za jeden den získat data o celé planetě.

Data z této družice mají využití v mnoha oblastech. Sleduje vývoj klimatu na Zemi, a díky tomu je možné zjišťovat, které kroky je dobré podniknout ke zmenšení emisí a tím také zpomalovat globální oteplování. Také najde uplatnění v meteorologii nebo občanské bezpečnosti, což může zahrnovat využití při přírodních katastrofách a podobně.

Data jsou dostupná přímo na portálu Evropské vesmírné agentury Sentinel-5P Pre-Operations Data Hub (<https://s5phub.copernicus.eu/>). Přístup je umožněn široké veřejnosti i bez registrace, k přihlášení stačí použít jako přihlašovací jméno i heslo s5guest. Zakreslením polygonu do mapy se vytyčí zájmová oblast. Ve vyhledávači je možnost volby několika parametrů pro vyfiltrování hledaných dat. Nejdůležitějším je parametr Sensing period. Je to rozsah období, pro které byly snímky pořízeny. Dalším parametrem je Product type, zde jsou na výběr produkty všech plynů, o kterých družice pořizuje data. Určuje plyn, který chceme sledovat. V kolonce Processing level se volí úroveň zpracování jednotlivých produktů.

Celkově existují tři úrovně zpracování (Level-0, Level-1B a Level-2). Na portálu jsou dostupná pouze Level-1B a Level-2. Úroveň Level-0 obsahuje i telemetrii družice, data o senzorech, spektrometrech a pozici družice. Tyto data nejsou poskytnuta veřejnosti. Level-1B produkty jsou geolokalizovány a je radiometricky upraven vrchol atmosféry, zemské záření ve všech spektrálních pásmech i korekce slunečního ozáření. Mezi produkty úrovně Level-2 jsou dostupné geolokalizované celkové sloupce O₃, SO₂, NO₂, CO, HCHO a CH₄. Dále obsahují data o troposférických sloupcích ozonu, vertikální profily ozonu a informace o aerosolech a mracích.

(index aerosolové absorbance). Data úrovně zpracování Level-2 jsou dostupná v režimu NRT (Near Real Time) je to zhruba 3 hodiny po snímání. Data jsou ve formátu NetCDF4.

4. REŠERŠE LITERÁRNÍCH ZDROJŮ A ZHODNOCENÍ SOUČASNÝCH METOD

V České republice začalo imisní měření už v 70. a 80. letech dvacátého století. První stanice byly vybudovány v krajích s největším znečištěním – Moravskoslezském, Ústeckém a Libereckém. Měřily se především koncentrace oxidu siřičitého. Dnes se měří mnohem více škodlivých látek a stanice jsou rozmístěny rovnoměrněji po celé České republice. Sít' automatických stanic (AIM) provádí kontinuální měření částic PM_{10} a $PM_{2.5}$, oxidu dusíku NO_2 a NO , oxidu siřičitého SO_2 , oxidu uhelnatého CO , benzenu a přízemního ozonu. Monitorování a vyhodnocování ovzduší provádí ČHMÚ (Český HydroMeteorologický Úřad). Na stránkách ČHMÚ jsou dostupné údaje o indexu kvality ovzduší změřeném jednotlivými stanicemi.

4.1. Typy monitorovacích stanic ČHMÚ

Státní sít' imisního monitoringu (SSIM) je téměř rovnoměrně rozložena po celé České republice. Avšak v oblastech s větším znečištěním (velká města a průmyslové oblasti) je počet stanic vyšší. Používají se dva základní druhy stanic, manuální a automatické monitorovací stanice. Manuální stanice pouze zachycují vzorky, které je potřeba následně převést do laboratoře a podrobit analýze pro stanovení přesné koncentrace sledované znečišťující látky. Druhý typ stanic je automatický a vyhodnocuje koncentrace polutantů přímo na místě. Data jsou odesílány do datacentra v 10minutovém, nebo 1hodinovém intervalu. (Brzezina, 2018)



obrázek 2 - zdroj: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/publikace/60let.pdf>

V současné době se data o kvalitě stavu atmosféry získávají pozemními stanicemi, leteckým pozorováním a družicovým snímáním. Data z pozemních stanic se nazývají in-situ data. Jejich výhoda je vysoká přesnost a časové rozlišení, měření může probíhat v krátkých časových intervalech, ale je omezené pouze na místo, kde se stanice nachází. Takto získaná data často slouží pro porovnání s daty získanými pomocí družic. Dnes je na oběžné dráze několik družic sloužících ke sledování stavu atmosféry například Envisat s přístrojem SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorbtion SpectroMeter for Atmospheric CHartographY), Aura s přístrojem OMI (Ozone Monitoring Instrument) americké agentury NASA, nebo poměrně nová Sentinel-5P s přístrojem TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument), jejíž produkty budou použity v z této práci. Vyznačují se obrovskou výhodou časoprostorového rozlišení, což umožňuje získávat data na relativně velké ploše a v krátkých časových intervalech.

Studie s názvem Sensors and systems for air quality assessment monitoring and management: A review (Singh, 2021) systematicky hodnotí jednotlivé metody a senzory pro měření kvality ovzduší. Zjišťovali také počty publikací za určité roky, které obsahovaly určitá klíčová slova týkající se problematiky znečištění ovzduší. Ukázalo se, že od roku 2010 se pravidelně zvyšuje počet těchto publikací každým rokem. Autoři rozdělili metody do pěti kategorií, pozemní sběr vzorků a následná analýza v laboratoři, pozemní digitální senzory.

Letecké senzory, do této kategorie patří zařízení nesené pomocí dronů nebo letadel. Senzory umístěné na družicích a poslední kategorií jsou integrované systémy, což může být kombinace ostatních systému dohromady. Odvození výsledku spočívá ve výpočtech a statistických metodách.

První zmíněnou kategorií je pozemní sběr vzorků vzduchu a následném chemickém rozboru a zjištění koncentrací jednotlivých polutantů. Vzorky sbírají stanice umístěné v terénu. Většinou jsou stanice v oblastech s vyšším znečištěním, například větší města a průmyslové oblasti. Výhoda je vysoká přesnost určení koncentrace sledovaných polutantů ve vzorku. Velkou nevýhodou je, že je potřeba manuálně vzorek vzít a převést do laboratoře. Často je metoda využívána jako doplňující a zpřesňující.

Do další kategorie spadají pozemní digitální senzory. V České republice například síť automatických imisních stanic, kterou provozuje ČHMÚ. Výhodou takové sítě digitálních senzorů je vysoká přesnost. Tato metoda se považuje za velice užitečnou, avšak data jsou získány pouze pro určité body v prostoru. Na rozdíl od družicových snímačů nelze pokrýt celý region. Pro nejlepší výsledky je potřeba mít pravidelně rozmístěných mnoho stanic. Tato metoda je velice nákladná z hlediska údržby a zaplacení zaměstnanců, kteří se o stanice starají.

Sběr dat pomocí senzorů umístěných na dronech vyniká vysokou mobilitou, je výhodný v případě potřeby přesnějšího sledování menšího území. Délka snímání a rozloha je omezená hlavně kapacitou baterie dronu. Častým problémem je vliv větru způsobeného rotory dronů. Proto jsou snímače umístěny na prodloužené tyči, níže (cca 20 cm) pod samotným dronem.

V případě potřeby dat pro celosvětové pokrytí jsou nejlepší řešení senzory umístěné na družicích. Největším nepřítelem multispektrálních snímačů je oblačnost. Dnes už družice dosahují poměrně vysoké časoprostorové rozlišení, například Sentinel-5P 3,5 x 7 km. Díky této technologii je možné globálně sledovat efekt atmosférického znečištění na změnu klimatu. Multispektrální senzory obvykle dokážou měřit prvky PM, CO₂, NO₂, SO₂ a v případě O₃ umožňují oddělené snímat troposférický a stratosférický ozon. V plánu je systém geostacionárních družic, který vznikne díky spolupráci NASA, ESA a Jižní Korei. TEMPO

(Tropospheric Emissions: Monitoring Pollution) bude měřit znečištění nad severní Amerikou. Na geostacionární dráze nad Evropou se bude nacházet Sentinel-4 a GEMS (Geostationary Environment Monitoring Spectrometer) bude sledovat území Asie. Celý systém má poskytovat hodinové měření polutantů jako jsou O_3 , NO_2 , SO_2 , PM a aerosolů.

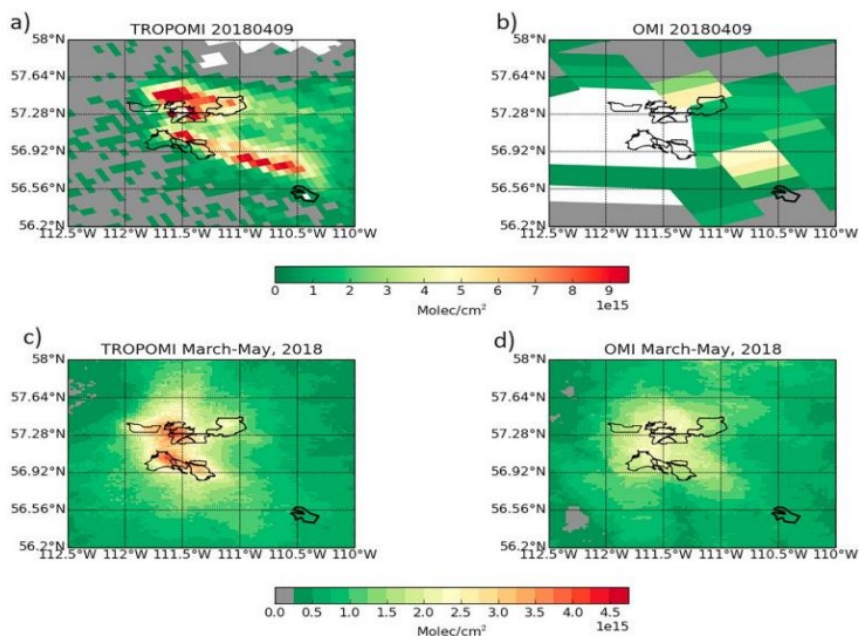
Poslední kategorie spíše doplňuje a kombinuje všechny předchozí. Klasické měření znečištění je doplněno pokročilými statistickými metodami, chytrými senzorovými sítěmi, strojovým učením nebo umělou inteligencí. Propojením dálkového průzkumu Země s geografickými systémy a pokročilou výpočetní technikou vznikají integrované systémy, které jsou díky těmto kombinacím nejlepším způsobem, jak monitorovat kvalitu ovzduší.

V posledním roce vzniklo velké množství článků, které zkoumají vliv koronavirové pandemie na ovzduší. Z důvodu celostátních karantén a lockdownů. To vyústilo ke značnému snížení hustoty dopravy. Největší pokles znečištění ovzduší však byl nad průmyslovými oblastmi všude po světě. Jeden z takových článků byl publikován v květnu 2020 - Impact of Coronavirus Outbreak on NO_2 Pollution Assessed Using TROPOMI and OMI Observations. Zjišťuje dopad koronavirové krize na znečištění oxidem dusičitým (NO_2) za použití dat ze senzoru TROPOMI na Sentinelu-5P a OMI (Ozone Monitoring Instrument), který se nachází na družici Aura. Bylo zjištěno, že průměrná koncentrace za leden až duben nad všemi Čínskými městy klesla o cca 40 % v porovnání se stejným časovým úsekem v roce 2019. V Evropě a USA byl pokles také vysoký – o 20 až 38 %. (Bauwens, 2020)

Za zmínku stojí publikace Assessing nitrogen dioxide (NO_2) levels as a contributing factor to coronavirus (COVID-19) fatality. Cílem této práce je zjištění, zda existuje vztah mezi dlouhodobou expozicí vyšším koncentracím NO_2 a zvýšenou úmrtností v souvislosti s nemocí způsobenou koronavirem. Pro mapování distribuce NO_2 v troposféře byl použit Sentinel-5P a re-analýza NCEP/NCAR byla použita k zhodnocení rozptylové schopnosti atmosféry. Jedná se o datový soubor, který obsahuje stále aktualizované, globální data o stavu atmosféry od roku 1948. Prostorová analýza byla provedena v regionálním měřítku. Byl porovnán počet úmrtí z 66 regionů v Itálii, Španělsku, Francii a Německu. Výsledky ukazují, že ze 4443 případů úmrtí bylo 3487 (78 %) v pěti regionech v severní Itálii a středním Španělsku. Zrovna tyto oblasti vykazují vyšší znečištění oxidem dusičitým v kombinaci sestupným prouděním vzduchu, který zhoršuje

rozptylové podmínky. Výsledkem studie je, že dlouhodobé vystavování se vyšším koncentracím NO_2 může přispívat k větší šanci na úmrtí v případě nemoci COVID-19. Z 4443 úmrtí na koronavirus bylo 83 % v regionech, kde byly naměřeny maximální koncentrace NO_2 nad $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2$. 15,5 % úmrtí připadalo na oblasti, kde byly maximální koncentrace NO_2 mezi 50 až $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2$. Pouze 1,5 % úmrtí bylo zaznamenáno v regionech s maximální koncentrací nižší než $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2$. (Ogen, 2020)

Starší práce z roku 2018 nes název High-Resolution Mapping of Nitrogen Dioxide With TROPOMI: First Results and Validation Over the Canadian Oil Sands. Autoři této práce porovnávají přístroj OMI a TROPOMI. Zaměřili se na mapování oxidu dusičitého v Kanadě v oblasti roponosných písku poblíž řeky Athabasca. Data naměřená z družic srovnávali také s in-situ daty pořízenými pozemní metodou i leteckou metodou. Také k srovnání použili kanadský model simulující přenos chemických látek v ovzduší včetně jejich koncentrací GEM-MACH. Data o koncentracích oxidu dusičitého byla zpřesněna o air mass factor (AMF) a albedo povrchu. Pro další zpřesnění hodnot AMF byl použit výše zmíněný kanadský model GEM-MACH. Odchylka od leteckého měření byla v případě dat z TROPOMI bez použití přesnějšího AMF 18 %. Po použití přesnějšího AMF se hodnota odchylky dostala na 5 %. Autoři také porovnali hodnoty albeda povrchu vypočtené modelem GEM-MACH a družicovým senzorem. Výsledkem bylo, že přístroj TROPOMI měl větší shodu s výše zmíněným modelem. Korelační hodnota byla 0,7 – 0,8. (Griffin, 2019)



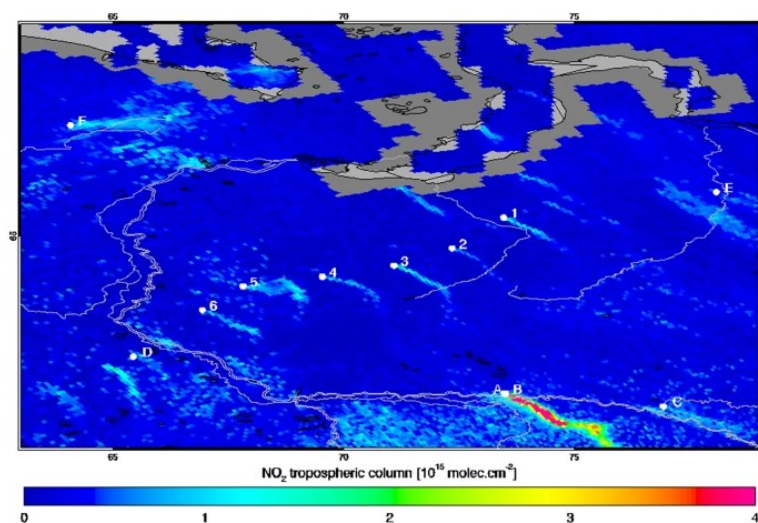
obrázek 3 - Porovnání družicových senzorů TROPOMI a OMI při měření NO₂ nad oblasti roponosných písků v Kanadě

Práce, která se zaměřuje na pozorování oxidu siřičitého a dusičitého za pomoci dat z přístroje TROPOMI a OMI nad územím jižní Afriky se jmenuje: Trend analysis and first time observations of sulphur dioxide and nitrogen dioxide in South Africa using TROPOMI/Sentinel-5 P data. Autoři ve studii používají sekvenční Mann-Kendallův test pro analýzu znečištění NO₂, SO₂ a SO₄ za 39 let (1980-2019) ze zdrojových oblastí jako jsou právě uhelné elektrárny. Stoupající trend znečištění byl zaznamenán v oblastech Mpumalanga, Limpopo a Gauteng. Důvodem pro rostoucí znečištění v tomto časovém intervalu je dlouhodobá zvyšující se poptávka po elektrické energii. Důvodem je velký počet uhelných elektráren, které nevyužívají zrovna nejmodernější technologie, a také ve velkém množství používají nekvalitní uhlí. (Shikwambana, 2020)

Publikace, která porovnává data pořízená přístrojem TROPOMI s daty naměřenými pozemním spektrometrem Pandora. Autoři porovnávají koncentrace oxidu dusičitého v Helsinkách ve Finsku mezi dubnem a zářím v roce 2018. Průměrná relativní odchylka mezi celkovými sloupci NO₂ naměřeného přístrojem TROPOMI a pozemním spektrometrem Pandora

je přibližně 10 %. Byla zjištěna vysoká korelace mezi družicovými a na zemi naměřenými daty. Korelační koeficient byl 0,68. (Ialongo, 2020)

Jeden z dalších článků je o měření emisí podél plynovodu zemního plynu na západní Sibiři. Bylo zjištěno, že kompresory, které čerpají plyn produkují značné množství oxidu dusičitého. Mnohem větší než kompresory na zemní plyn v severní Americe. Kompresory jsou podél potrubí každých 50 až 100 km. Jako palivo je spalován zemní plyn. Za normálních okolností jsou vyfiltrovány pixely v místech s větší oblačností i v místech, kde se nachází sněhová pokrývka. Zjištění emisí NO₂ na zasněžených pláních Sibiře bylo možné díky nově vyvinuté technice CSD (Cloud-Snow Differentiation method) rozlišovat sněhovou pokrývku a oblačnost. S metodou CSD se zvyšuje počet použitelných pixelů o 6 až 39 % za určitý měsíc v závislosti na ročním období. Emise kompresorů se pohybovaly v rozmezí 15 až 45 Mg(N) měsíc⁻¹. Množství emisí je podobné jako větší elektrárna na zemní plyn. Nebo středně velká uhelná elektrárna. Autoři přirovnávají měsíční emise k emisím celého města Amsterdam s populací kolem jednoho milionu obyvatel, což se odhaduje na 30 Mg(N) měsíc⁻¹.



obrázek 4 - NO₂ koncentrace nad západní Sibiří. TROPOMI 14. dubna 2019.
(<https://www.nature.com/articles/s41612-020-0119-z/figures/2>)

5. NAVRŽENÍ VHODNÉHO POSTUPU A ZPRACOVÁNÍ DRUŽICOVÝCH DAT PRO VYBRANOU OBLAST

5.1. Popis software VISAN

Pro práci s daty Sentinelu-5P jsem si vybral nástroj Basic Envisat Atmospheric Toolbox (BEAT), což je balíček několika opensource aplikací pro zpracovávání atmosférických dat. Opensource je druh licence pro software a znamená to, že kdokoli může nahlédnout do zdrojového kódu a upravovat ho. Obsahuje několik softwarových komponentů: CODA, HARP, VISAN a QDOAS. Byl vyvinut Evropskou vesmírnou agenturou. Je kompatibilní se všemi známými operačními systémy jako je Linux, MacOS nebo Windows.

CODA – Umožňuje přímý přístup k datům produktu. Podporuje mnoho různých formátů dat. Všechny soubory jsou dostupné prostřednictvím CODA C library. Obsahuje několik rozhraní pro přímé získání údajů o produktech za použití programovacího jazyka Fortran, IDL, MATLAB nebo Pythonu.

HARP – Nástroj pro čtení, zpracování a vzájemné porovnání družicových dat, modelových dat, in-situ dat a dat založeném na pozemním dálkovém měření. Skládá se z několika příkazů. Má přímé rozhraní pro jazyky Python, R, IDL nebo MATLAB.

Pro mou práci jsem používal VISAN, který slouží hlavně pro vizualizaci a analýzu atmosférických dat. Při práci se používají příkazy v programovacím jazyce Python. Umožňuje také procházení produktu a zobrazení metadat. Slouží i jako rozhraní, ve kterém je možno zadávat příkazy, které jsou součástí nástroje CODA nebo HARP. Například příkaz `harp.import_product()`.

BEAT podporuje produkty z několika nástrojů, hlavními jsou: TROPOMI (družice Sentinel-5P), GOME-2 a IASI (MetOp), OMI, TES a MLS (družice Aura), GOMOS, MIPAS, SCIAMACHY (družice Envisat) a GOME (ERS-2).

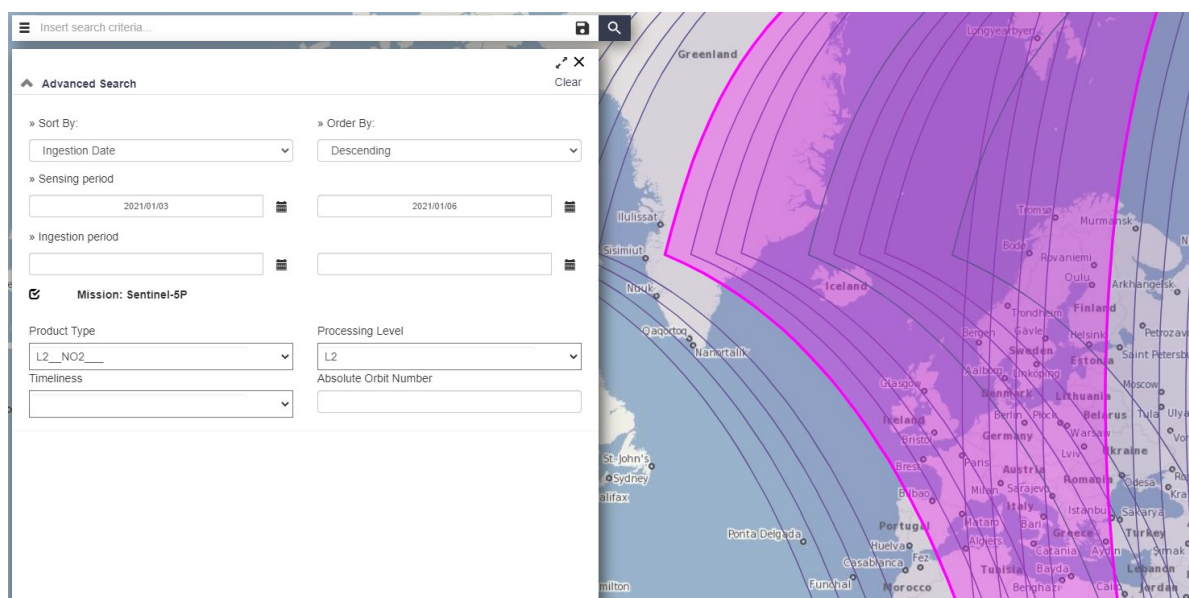
Instalace VISANu

Pro instalaci VISANu je nutné nainstalovat software ANACONDA, což je volně dostupná distribuce programovacího jazyka Python. Po instalaci je dostupné prostředí CONDA, které

umožňuje instalovat a spravovat jednotlivé balíčky, jedním z takových je právě VISAN. Správu balíčku lze provádět buď přes příkazový řádek nebo přes vizuální prostředí nazývané Anaconda Navigator. Zde můžeme vytvářet virtuální prostředí a v každém můžeme mít nainstalované jiné programové balíky. (ArcData, 2019)

Ukázka prostředí programového produktu VISAN

Družicová data byla stažena prostřednictvím portálu Sentinel-5P Pre-Operations Data Hub, který právě poskytuje data ze Sentinelu-5P. Přístup je umožněn široké veřejnosti, k přihlášení stačí zadat s5pguest jako jméno i jako heslo. Pomocí zakreslení polygonu do mapy proběhne zvolení zájmové oblasti. V mém případě to byla střední Evropa. Ve vyhledávači je možnost volby několika parametrů. Tím nejdůležitějším je Sensing period čili rozsah období, pro které chceme data získat. Dalším důležitým parametrem je Product type kde si určíme, jaký produkt zrovna potřebujeme. Například název produktu pro oxid dusičitý vypadá takto: L2_NO2_. L2 značí úroveň zpracování a NO₂ je chemická zkratka oxidu dusičitého. Všechny produkty, které jsem použil jsou úrovně 2, mezi ně právě patří produkty obsahující koncentrace jednotlivých plynů.



obrázek 5 - rozhraní <https://s5phub.copernicus.eu/>

Jak je výše už zmíněno VISAN umožňuje procházení struktury produktů. Po otevření vidíme, že se produkt skládá ze dvou hlavních složek – METADATA a PRODUCT. Složka PRODUCT obsahuje samotná data v tabulkové formě. Je zde možnost zobrazit data na 2D grafu. Nachází se zde i tabulka s hodnotami qa_value (quality assurance value). Tato hodnota určuje kvalitu dat na základě výskytu oblačnosti. Hodnota 1 značí nejvyšší kvalitu a v případě 0 nejsou data dostupná. V příručce je doporučeno používat data s qa_value > 0,75, protože odstraňuje scény s větším výskytem oblačnosti. Méně striktní doporučené hranice je qa_value > 0,5. V podsložce SUPPORT_DATA jsou dodatečná a podpůrná data, jako geolokace, data o kalibraci přístrojů, pozici družice atd. Ve složce METADATA jsou data o datech, například složka QA_STATISTIC obsahuje histogramy produktů. (Eskes, 2020)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2687	nan	1.20184831757	1.72935979207	1.22831906992	1.56495971168	8.40754273667	7.28633176549	1.04756863947	9.93818139249	1.13333599074	9.308743751
2688	nan	5.48567322766	6.67912399876	2.34517938224	1.32990526253	7.57116367822	1.08457998067	1.14035719889	8.80635161593	6.79709728501	6.903120721
2689	nan	9.24915184441	8.94827007869	1.53090695675	8.30038698040	6.96188271831	1.09601760414	7.82609913585	1.54041226778	7.80821847001	1.096777661
2690	nan	1.41569080369	1.50942260006	5.04890658703	7.90935428085	8.84783912624	8.76568083185	1.01022815215	1.06112802313	1.48082426676	1.200801031
2691	nan	1.38458590299	1.70147250173	1.62710493896	1.00869992820	8.61756143422	1.10507407953	1.27843741211	1.62957967404	8.39544463815	1.689030251
2692	nan	1.35272957777	1.67481139214	8.17591717350	1.01302839539	1.24821463032	1.30178350445	1.07066507553	1.09903121483	1.01479954537	1.114468521
2693	nan	1.25451279018	1.80447004822	1.84807959158	7.34070954422	1.39049070639	4.75247179565	1.51104213728	9.08986839931	1.30508542497	1.302235431
2694	nan	1.55336547322	1.06054631032	1.64877947099	1.10990358734	1.42264198075	1.34881165649	1.77611345861	1.19504975373	1.55700709001	1.350450651

obrázek 6 - Browse product (funkce pro prohlížení dat v nástroji VISAN)

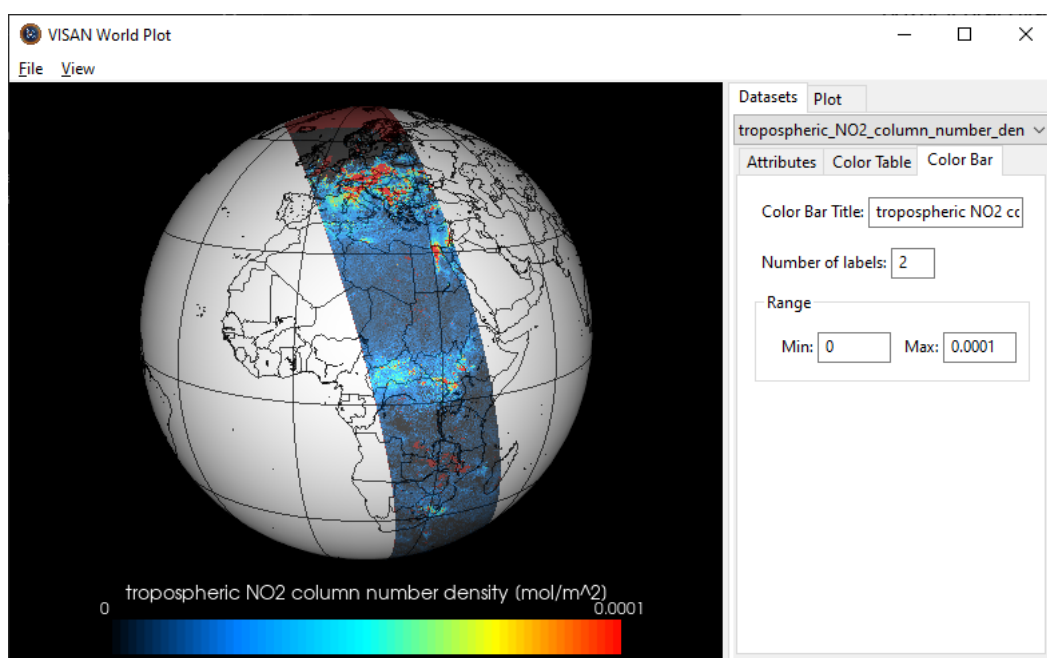
Nástroj VISAN umožňuje operovat s nástrojem HARP a použít příkaz `harp.import_product()`. Ten importuje data v .nc formátu, stačí vybrat cestu k souboru a zvolit jméno proměnné. Tato funkce rovnou uloží produkt do proměnné, se kterou lze později pracovat. Provedený příkaz vypadá například takto:

```
nazev_promenne =  
harp.import_product(r"D:\cesta\S5P_OFFL_L2__NO2____20190110T103700_20190110  
T121830_06442_01_010202_20190116T123938.nc")
```

Následně stačí zadat příkaz ke zobrazení vizualizace daného produktu.

```
wplot(nazev_promenne)
```

Zobrazení dat na wplotu může vypadat takto:



obrázek 7 - Ukázka použití wplot()

Jak lze na obrázku vidět, jsou zde dvě záložky: Datasets a Plot. V záložce Plot se nastavuje pomocí zeměpisné šířky a zeměpisné délky oblast, kterou chceme zobrazit a pomocí zoom přiblížení. V kolonce Projection je na výběr z několika projekcí. Předem nastavená je 3D projekce Země ve tvaru koule. S objektem Země lze pomocí levého tlačítka na myši otáčet a pravým tlačítkem jde přibližovat a oddalovat. Záložka Datasets slouží k nastavení barev

v legendě, k nastavení popisku legendy a rozsahu. Výsledek je možné exportovat v obrázkových formátech jako je TIFF, Windows Bitmap, JPEG, PNG nebo PNM.

5.2. Popis pracovního postupu při vytváření vizualizace

V případě porovnání znečištění vybranými plyny pro roční období jsem stáhnul data pro 10 dní v jednom měsíci z daného ročního období. Vybral jsem si jeden měsíc z každého ročního období a z toho měsíce jsem si stáhnul data od 10. do 20. dne. V případě jara používám data z dubna, pro léto data z července, pro podzim data z října a pro zimu data z ledna. Porovnávám průměry pouze z 10 dní z důvodu, že data jsou poměrně objemná, takže stahování je časově náročné a operace s ještě většími objemy dat by asi vyžadovaly větší výpočetní výkon. Například složka s daty pro vybraná roční období zabírá přes 200 GB.

Jako první je potřeba převést pozemní pixely produktu úrovně 2 na pravidelnou mřížku. K tomuto procesu slouží funkce `bin_spatial()`; z nástroje HARP, který převádí všechny původní pixely na pravidelnou mřížku určenou pomocí zeměpisné šířky a délky. Pracuje s těmito parametry:

```
bin_spatial(lat_edge_length, lat_edge_offset, lat_edge_step, lon_edge_length, lon_edge_offset, lon_edge_step);
```



obrázek 8 - Převzorkování na pravidelnou mřížku, převzato z <https://rus-copernicus.eu/>

Po použití funkce `bin_spatial()` se uloží do výstupního produktu pouze hranice buněk mřížky. Pro zapsání středových souřadnic prostorové mřížky slouží funkce

```
derive(longitude{longitude}); derive(latitude{latitude})
```

Pro filtraci nevhodných pixelu, třeba z důvodu oblačnosti v daném místě se používá proměnná `number_density_validity`. Například v případě oxidu dusičitého (NO_2) je celý její název `tropospheric_NO2_column_number_density_validity`. Podle uživatelské příručky o

produktech se doporučuje u NO₂ používat hodnota větší než 70 a u většiny ostatních plynů větší než 50. Číslo 100 znamená nejvyšší kvalitu daného pixelu a 0 nejnižší.

Provedení těchto příkazů je možné přes příkazový řádek, je ale nutné aktivovat prostředí ve kterém je nainstalovaný HARP. To lze udělat použitím výše zmíněného programu anaconda navigator a otevření příkazového řádku zde. V případě používání cmd na Windows se na rozdíl od Linuxu nepoužívají jednoduché uvozovky, ale dvojité. HARP umožňuje provést celou sadu operací najednou, používá se k tomu příkaz harpconvert:

```
harpconvert -a "tropospheric_NO2_column_number_density_validity>70;  
bin_spatial(400,36,0.05,1020,-18,0.05); derive(latitude {latitude});  
derive(longitude {longitude})"  
D:\cesta\S5P_OFFL_L2__NO2____20190110T103700_20190110T121830_06442_01_01020  
2_20190116T123938.nc D:\cesta\L3_NO2.nc
```

Na konec se píše cesta ke vstupnímu produktu a cesta, kde chceme uložit výstupní produkt. Takto jsem zpracoval všechny produkty pro vybrané dny v měsíci. Dalším krokem je vytvoření průměru z dat za několik dní a sloučení do jednoho produktu. K tomu slouží příkaz harpmerge:

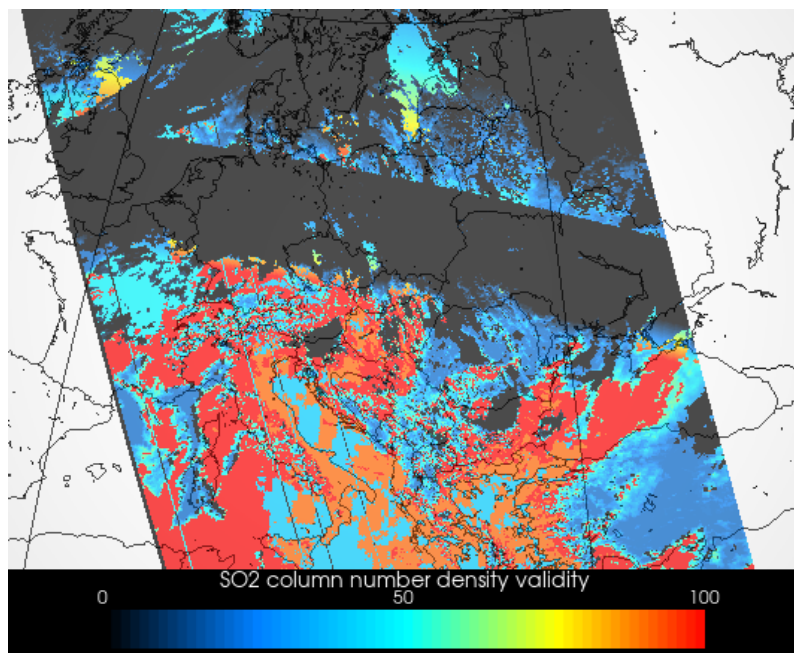
```
harpmerge -ap "bin(); squash(time, (latitude,longitude))" C:\cesta\  
C:\cesta\mergedNO2.nc
```

Pomocí výše vysvětlené funkce harp.import_product() jsem naimportoval zprůměrovaný produkt do VISANu. Při importu jsem ještě pro lepší přehlednost převedl jednotky z mol/m² na Pmolec/cm², P jako PETA, což je počet molekul daného plynu ×10¹⁵ na centimetr čtvereční). Vizualizoval jsem produkt pomocí wplot() a nastavil jsem popisky legendy.

```
Leden = harp.import_product(r"D:\cesta\produkt.nc",  
operations='derive(tropospheric_NO2_column_number_density [Pmolec/cm2]);')
```

6. VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ V JEDNOTLIVÝCH ROČNÍCH OBDOBÍCH

Porovnával jsem data za 10 dní z jednoho měsíce pro každé roční období, konkrétně leden, duben, červenec a říjen. Vybral jsem si rok 2019, protože je to poslední rok, který nebyl ovlivněn žádným omezením průmyslu nebo pohybu obyvatel z důvodu koronavirové pandemie. Podrobněji jsem se zaměřil na koncentrace oxidu dusičitého (NO_2). Porovnával jsem střední Evropu, průměrné koncentrace za jednotlivé státy v rozdílných ročních obdobích a následně jsem se zaměřil i na oblast České republiky a část Polska poblíž hranic s ČR. Hodnoty pro střední Evropu jsou vyjádřeny v jednotkách Pmolec/m^2 , (počet molekul $\times 10^{15}$ na metr čtvereční) a hodnoty v případě oblasti ČR a Polska jsou v jednotkách mol/m^2 . Převod například do $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ je v celku komplikovaná úloha, protože je potřeba pracovat s dalšími daty o atmosférickém profilu a výšce vrstvy sledovaného plynu. Na produktech oxidu siřičitého a formaldehydu bylo v lednu vyfiltrováno značné množství nepoužitelných pixelů kvůli jejich nedostatečné kvalitě. Týká se to oblasti „pruhu“ napříč střední Evropou, viz následující obrázek, který vyobrazuje kvalitu jednotlivých pixelů. Konkrétně pro SO_2 je podle uživatelské příručky k tomuto produktu doporučeno používat pixely s hodnotou $\text{SO2_column_number_density_validity} > 50$. Tuto podmínku většina pixelu nesplňovalo. Z většiny to mohlo být způsobeno zvýšenou oblačností v těchto dnech. Z tohoto důvodu jsem se s těmito daty nezabýval podrobněji.



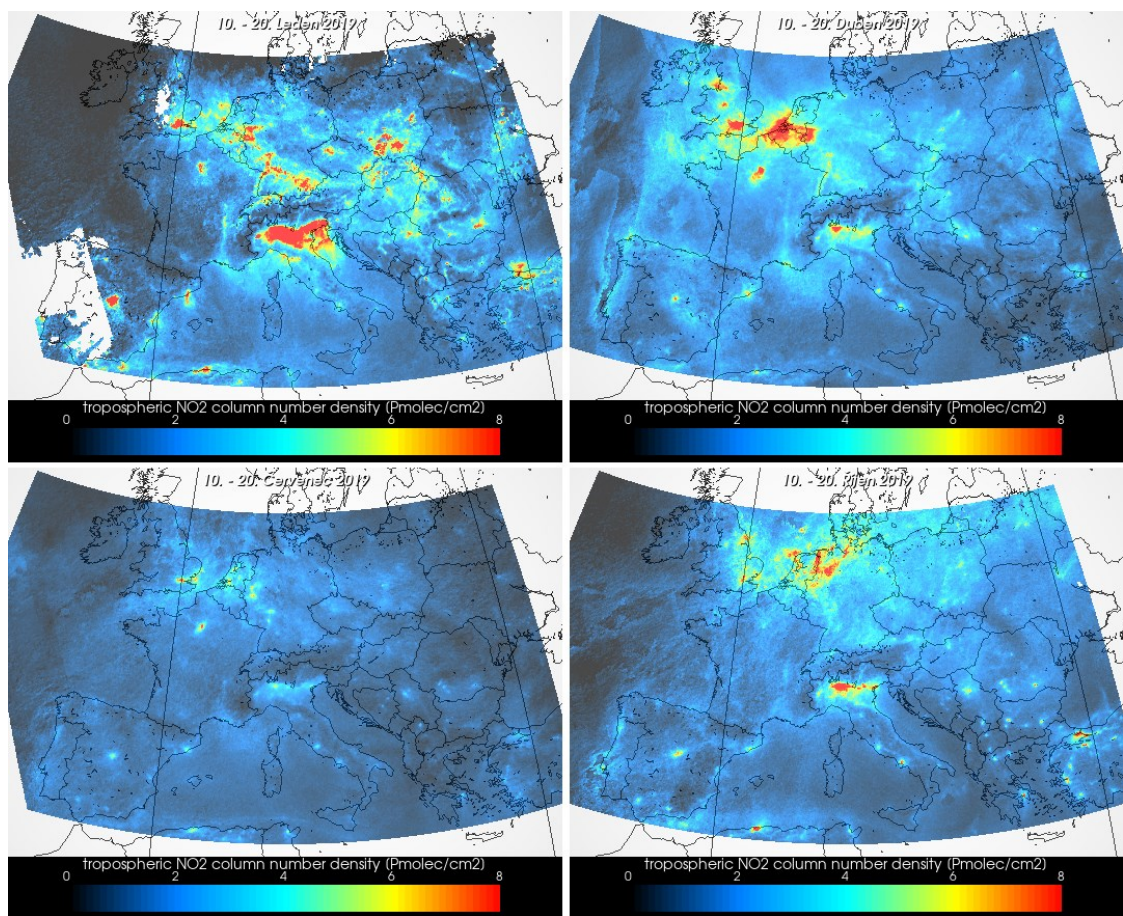
obrázek 9 - SO₂ column number density validity určující kvalitu jednotlivých pixelů.

6.1. Oxid dusičitý NO₂

Střední Evropa

Data pro střední Evropu jsou vizualizována prostřednictvím VISANU. V případě průměrných koncentrací oxidu dusičitého ve střední Evropě můžeme na první pohled vidět, že nejvýznamnější rozdíly jsou mezi zimním a letním měsícem. V zimě jsou často díky mrazům a menšímu větru snižené rozptylové podmínky. To zapříčiňuje vytváření smogu a udržování znečišťujících látek a městech a průmyslových oblastech. V případě měsíce leden je viditelné výrazně větší znečištění NO₂ v celé střední Evropě. Největší rozdíl lze pozorovat v severní Itálii, kde v lednu skoro celý sever dosahoval nejvyšší hodnoty 8 Pmolec/cm². Po zvětšení obrázku jsou dobře vidět vyšší koncentrace oxidu dusičitého ve větších Evropských městech jako je například Londýn, Paříž nebo Madrid. V České republice byly vyšší koncentrace kolem větších měst jako je Praha, Brno, Ostrava a celkově Moravskoslezský kraj. Kousek přes hranice s Polskem se konkrétně v jižní části Polska je významná průmyslová oblast s nízkou kvalitou ovzduší, zde lze také pozorovat výrazně vyšší koncentrace oxidu dusičitého v zimním období. Ovzduší bylo nejčistší v létě, kdy byly koncentrace NO₂ nejmenší, průměr za střední Evropu byl 0,000018 mol/m². V několika velkých městech, jako je Londýn, Paříž nebo část západní

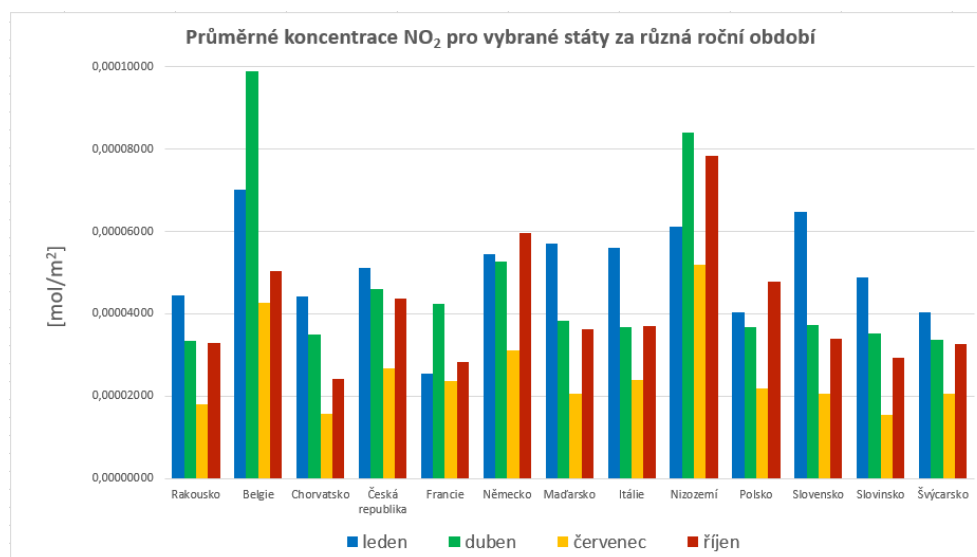
Evropy, jsou hodnoty pořád vyšší 0,00005 až 0,00006 mol/m². To je způsobeno velice hustou dopravou, která je jedním z největších zdrojů oxidu dusičitého. Jarní a podzimní období je na tom velice podobně, záleží hlavně na meteorologických podmínkách v období, kdy bylo snímání prováděno.



obrázek 10 - Průměrné koncentrace NO₂ pro střední Evropu za 10 dní v měsících leden, duben, červenec a říjen. [Pmolec/cm²]

Zpracována družicová data jsem otevřel v software QGIS. Přidal jsem si vrstvu států Evropské unie a vybral jsem si několik zemí z oblasti střední Evropy. Pro tyto státy jsem pomocí funkce Zonal statistic vypočítal průměrné hodnoty všech pixelu pro daný stát v jednotkách [mol/m²]. Ve většině případu byly průměrné koncentrace nejhorší v lednu, tedy v zimním období. Výjimkou jsou státy, jako Nizozemí a Belgie tedy západní část střední Evropy. V těchto místech byly nejvyšší koncentrace NO₂ v dubnu. Největší průměrná koncentrace za určitý stát

byla v Belgii v dubnu – téměř $0,0001 \text{ mol/m}^2$. Úplně pro všechny státy platí, že nejmenší znečištění oxidem dusičitým bylo v létě v červenci.



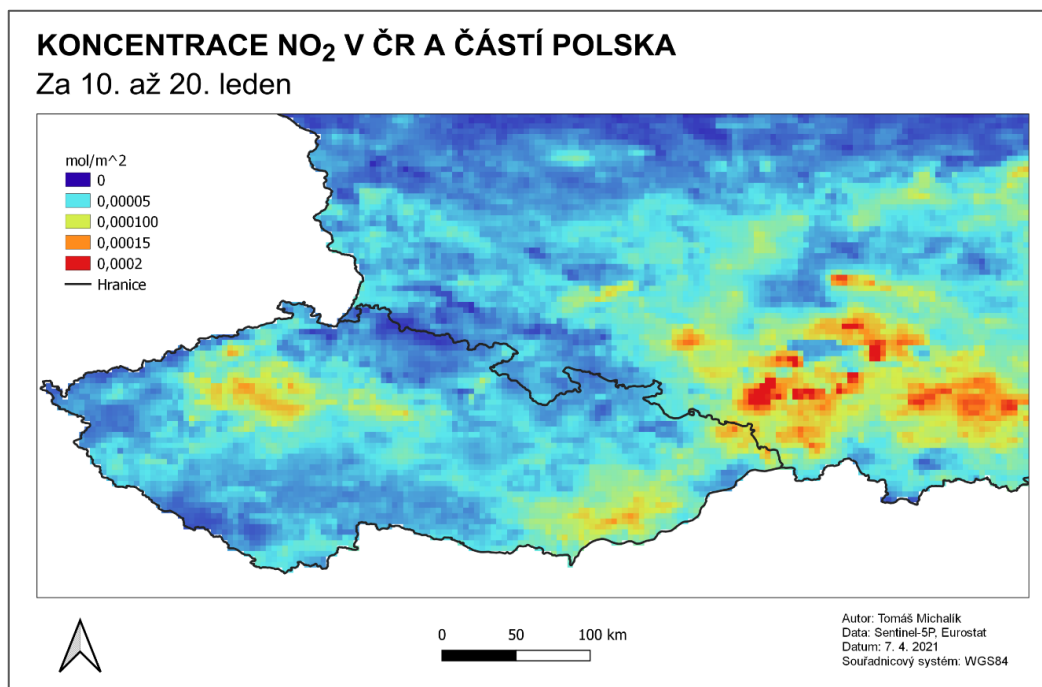
obrázek 11 - Sloupcový graf koncentrací NO_2 pro různá roční období ve vybraných státech

Porovnání oblasti ČR a části Polska

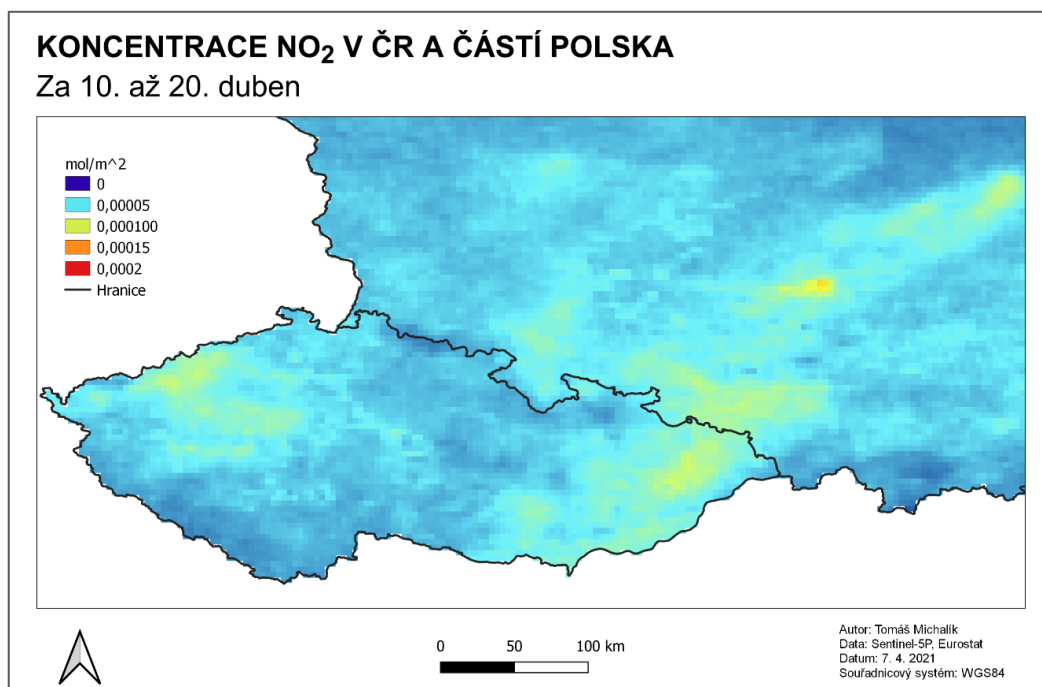
Data za tuto oblast jsou zpracovány také v nástroji HARP, ale pro vizualizaci jsem zvolil QGIS pro možnost vytvořit přehlednější výstup. Jediný rozdíl je v tom, že je rastrová vrstva ořezaná na potřebné území. Zde jsem nepřeváděl jednotky, tím pádem zůstaly v $[\text{mol/m}^2]$. Dále jsem za použití softwaru Argis Pro vytvořil histogramy charakterizující distribuci hodnot jednotlivých pixelů v České republice i Polsku za každý sledovaný měsíc. Z mapových výstupů je zřejmé, že největší znečištění oxidem dusičitým bylo v zimním období. Nejvyšší koncentrace NO_2 byly ve větších městech a jejich okolí (Praha, Brno a Ostrava). Lehce zvýšené koncentrace byly vidět i podél nejfrekventovanějších silničních úseků jako je například dálnice D1. Zatímco v České republice nejvyšší koncentrace dosahovaly $0,0001$ až $0,00015 \text{ mol/m}^2$, na jihu Polska byly maximální koncentrace i $0,0002 \text{ mol/m}^2$. Průměrné koncentrace za Českou republiku v lednu dosahovaly $0,00005 \text{ mol/m}^2$. V Polsku byla průměrná koncentrace $0,00004 \text{ mol/m}^2$, což je způsobeno tím, že Polsko je rozlohou velká země a naprostá většina průmyslu a obyvatel se koncentruje do jižní části. To znamená, že v severní části je mnohem menší znečištění ovzduší, což významně snižuje průměrnou hodnotu za danou zemi.

Podle předpokladu bylo ovzduší nejčistější v létě. Průměrné koncentrace NO_2 byly v obou zemích skoro o polovinu nižší v červenci než v lednu. Rozdíl je způsoben rozptylovými podmínkami.

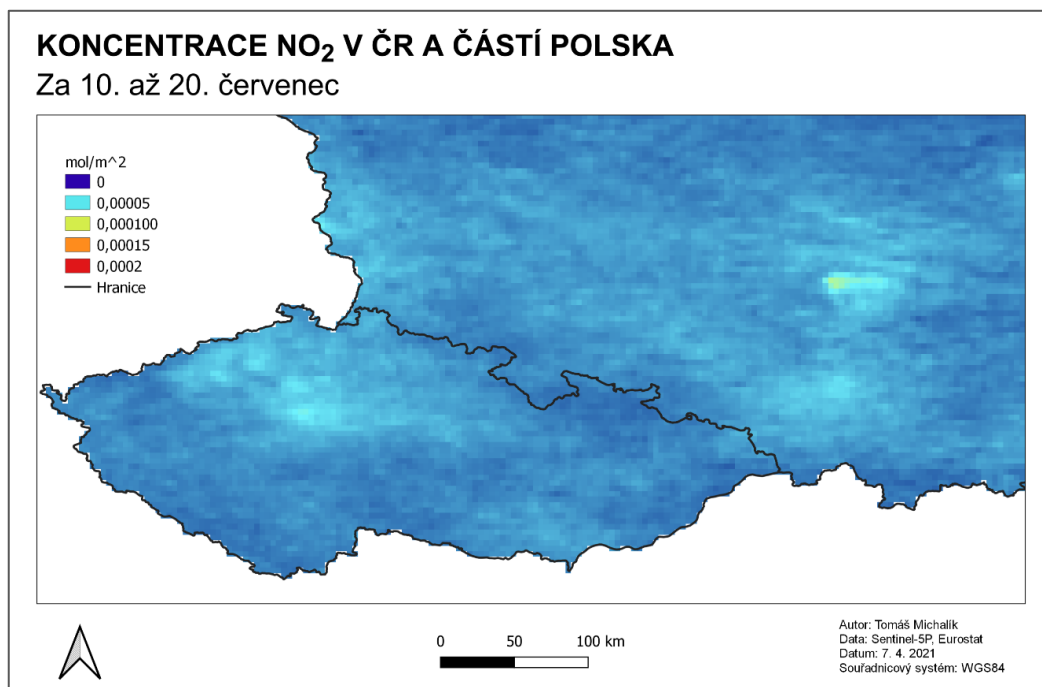
Na jaře a na podzim byly koncentrace NO_2 také vyšší. Průměrná hodnota za Polsko byla nejvyšší v říjnu $0,00005 \text{ mol/m}^2$. Znečištění v těchto měsících nebylo tolik koncentrováno okolo větších měst jako tomu bylo v zimě, ale bylo více rozptýleno.



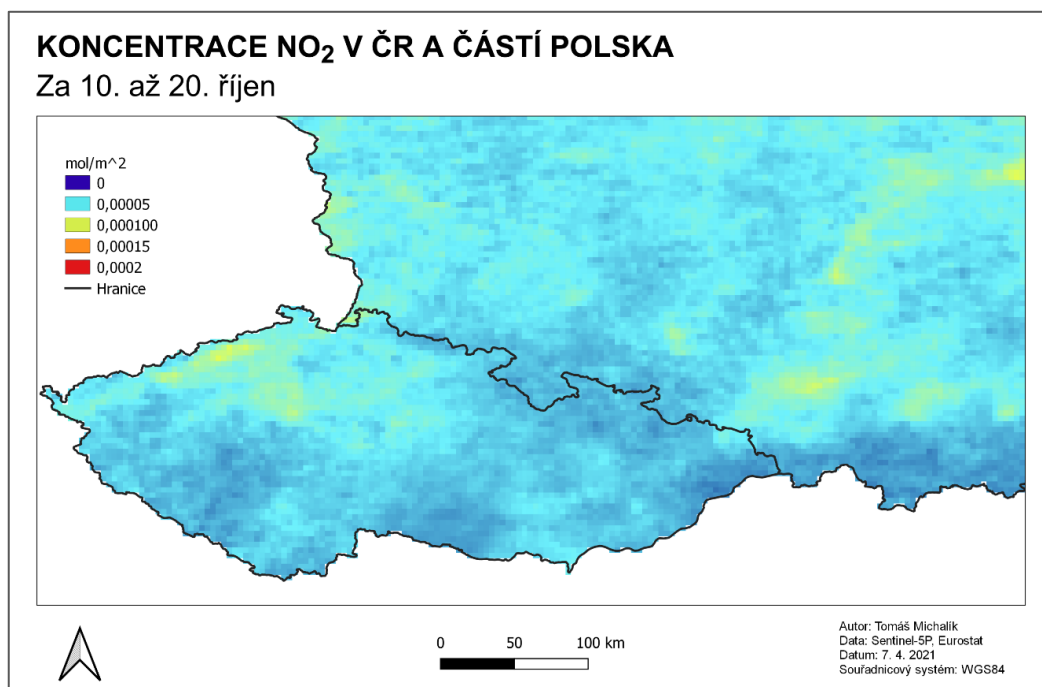
obrázek 12 - Koncentrace NO₂ v ČR a části Polska za 10. až 20. leden. [mol/m²]



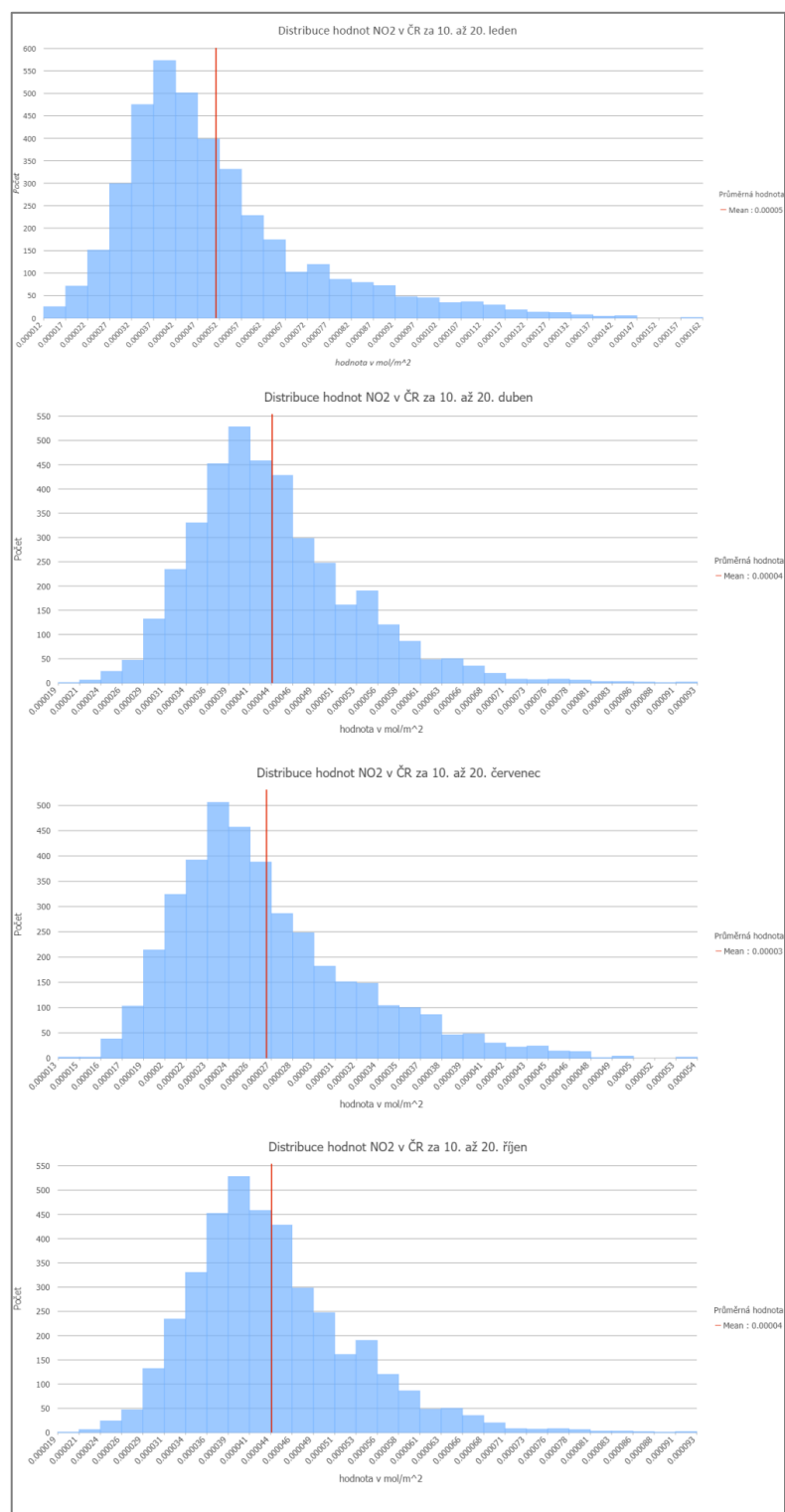
obrázek 13 - Koncentrace NO₂ v ČR a části Polska za 10. až 20. duben. [mol/m²]



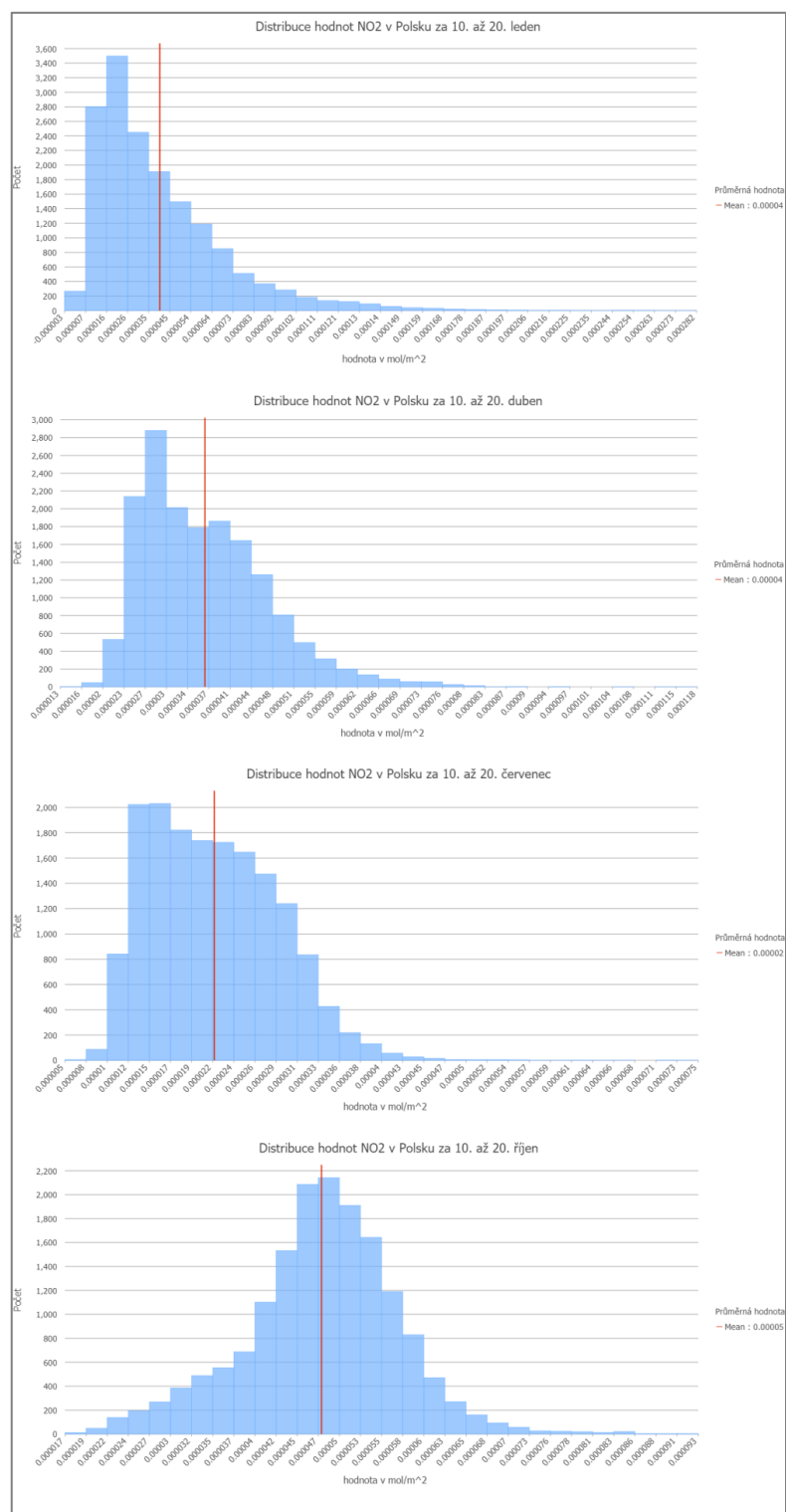
obrázek 14 - Koncentrace NO₂ v ČR a části Polska za 10. až 20. červenec. [mol/m²]



obrázek 15 - Koncentrace NO₂ v ČR a části Polska za 10. až 20. říjen. [mol/m²]



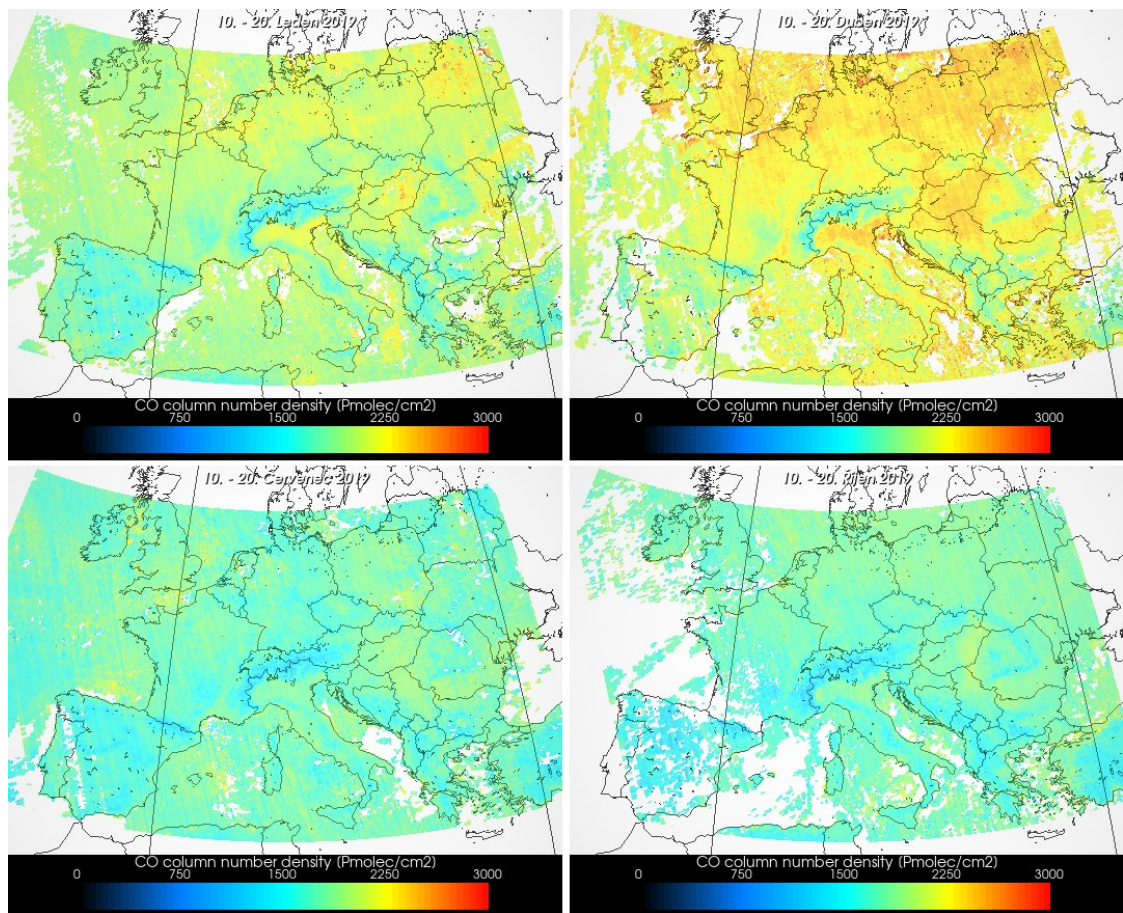
obrázek 16 - Distribuce hodnot NO_2 pro ČR za 10 dní v měsících leden, duben, červenec a říjen.



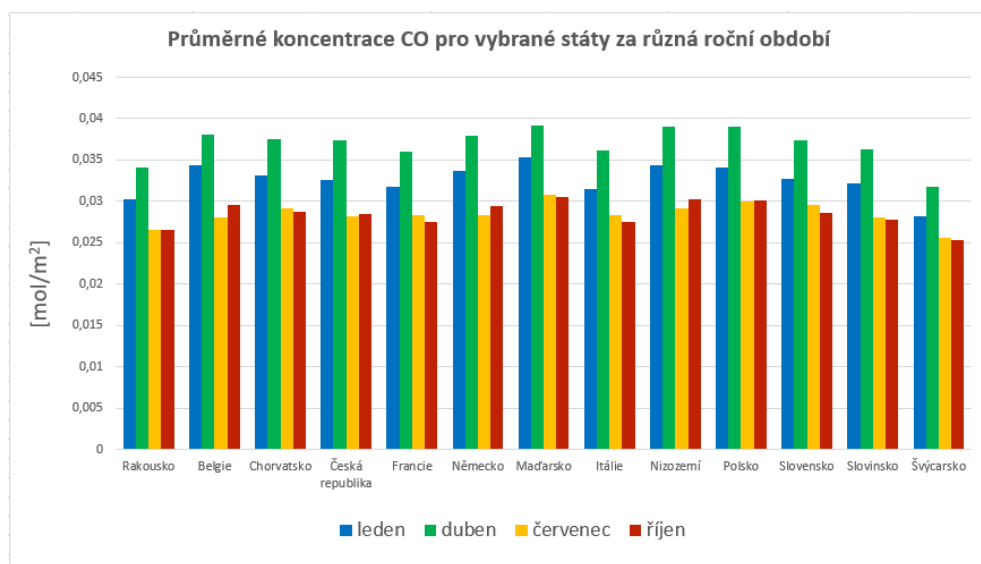
obrázek 17 - Distribuce hodnot NO₂ pro Polsko za 10 dní v měsících leden, duben, červenec a říjen.

6.2. Oxid uhelnatý CO

Při zpracovávání oxidu uhelnatého (CO) jsem použil průměr pouze 5 dní, protože v případě průměrování dat za víc než 5 dní se výsledný produkt nepodařilo vytvořit. Produkty, pro CO jsou také z období snímání 10. až 20. dne v každém vybraném měsíci, avšak ne pro každý den z toho intervalu ale obden (10., 12., 14., 16., 18. a 20.). Oxid uhelnatý je v atmosféře hodně rozptýlen. V tomto případě byly nejvyšší koncentrace na jaře v dubnu. Ze snímků můžeme usoudit, že CO se drží v nižších nadmořských výškách. Když se zaměříme na místa, na kterých se nachází nějaká pohoří například Alpy, tak vidíme, že jsou v těchto místech nižší koncentrace tohoto plynu. Oxid uhelnatý jsem už nesledoval podrobněji na území České republiky a Polska, protože se koncentrace CO, na takovém malém území moc nemění. Nelze ani posoudit, zda jsou vyšší koncentrace v oblasti větších měst. Na grafu níže (obr. 18) lze vidět, že se průměrné koncentrace jednotlivých států moc neliší ani v závislosti na ročních obdobích.



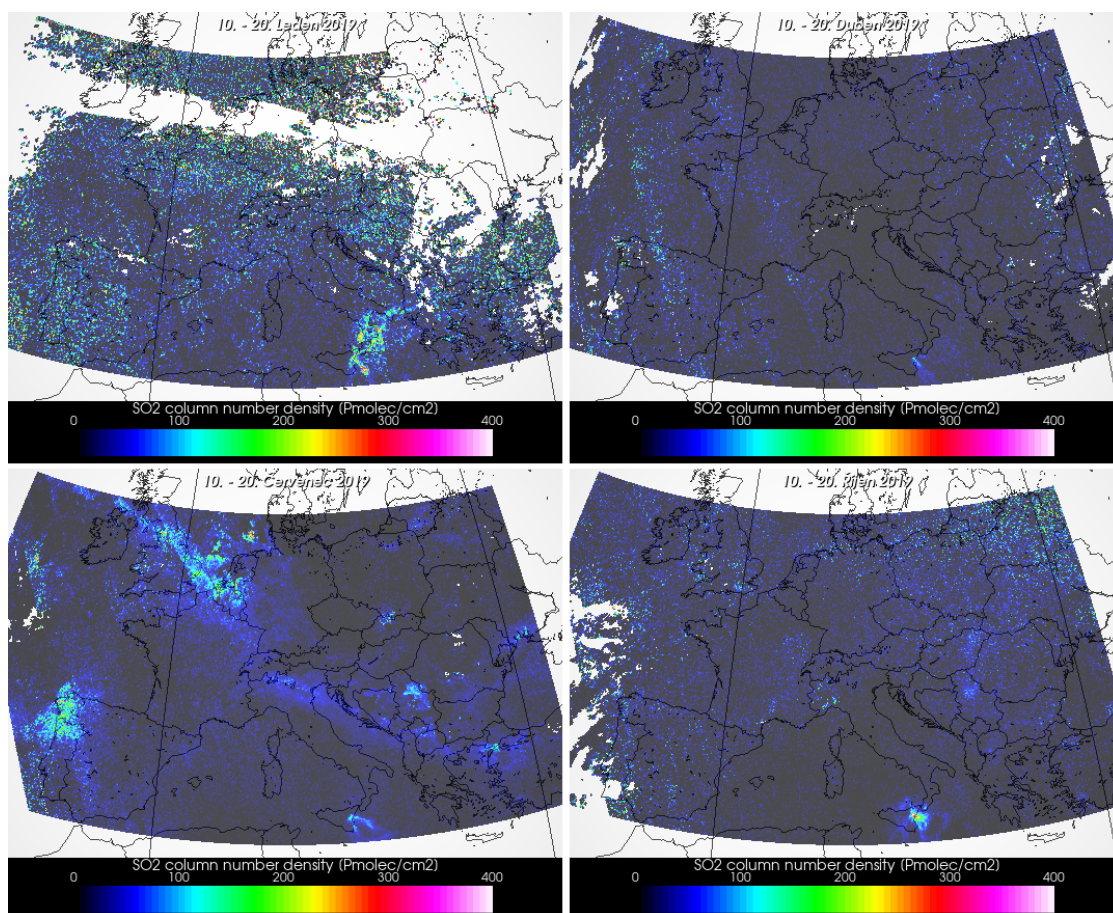
obrázek 18 - Průměrné koncentrace CO [Pmolec/cm²]



obrázek 19 - Sloupcový graf koncentrace CO, pro různá roční období ve vybraných státech

6.3. Oxid siřičitý SO₂

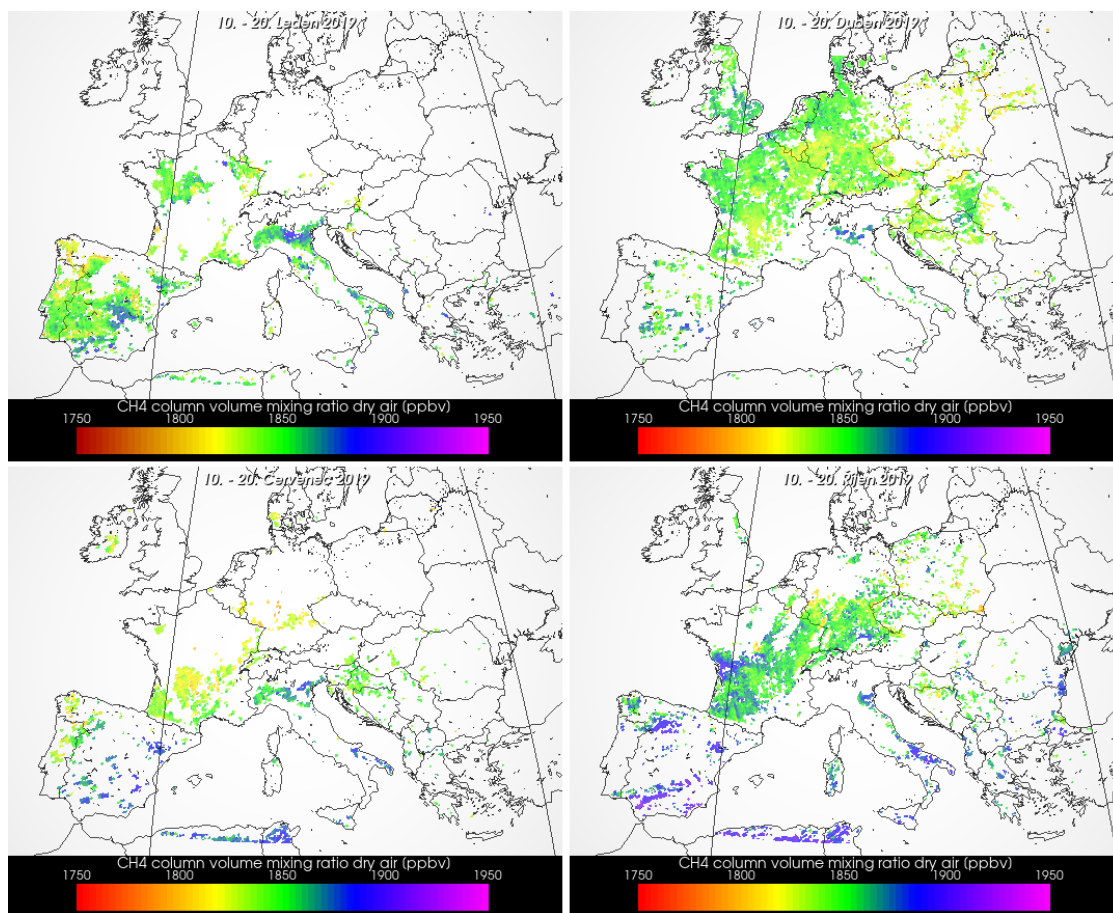
Další následující obrázek ukazuje koncentrace oxidu siřičitého (SO₂) ve stejných jednotkách jako předchozí, tedy Pmolec/cm². SO₂ bývá v atmosféře více rozptýlen než NO₂. Jak už bylo popsáno výše, na snímku z ledna je vyfiltrovaný značný počet pixelů kvůli nedostatečné kvalitě. Pravděpodobně kvůli zvýšené oblačnosti. Zajímavostí je, že na všech snímcích SO₂ můžeme vidět sopečnou aktivitu sopky Etny na Sicílii. Sopky jsou při erupcích velkým zdrojem oxidu siřičitého.



obrázek 20 - Průměrné koncentrace SO₂ [Pmolec/cm²]

6.4. Methan CH₄

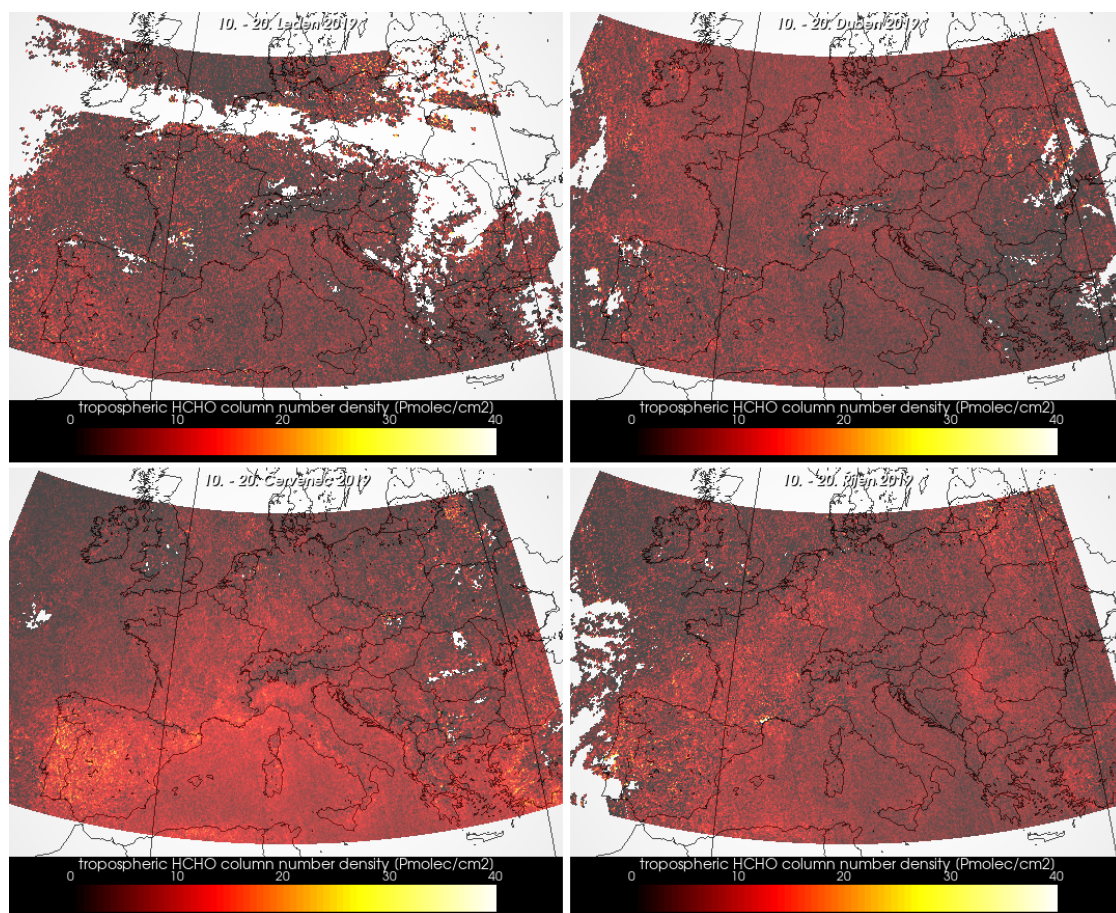
Koncentrace methanu je vyjádřena v jednotkách ppbv (parts per bilion). Samotná ještě neupravená družicová data obsahovala mnoho pixelů, kterým nebyla přiřazena žádná hodnota.



obrázek 21 - Průměrné koncentrace CH₄ [ppbv]

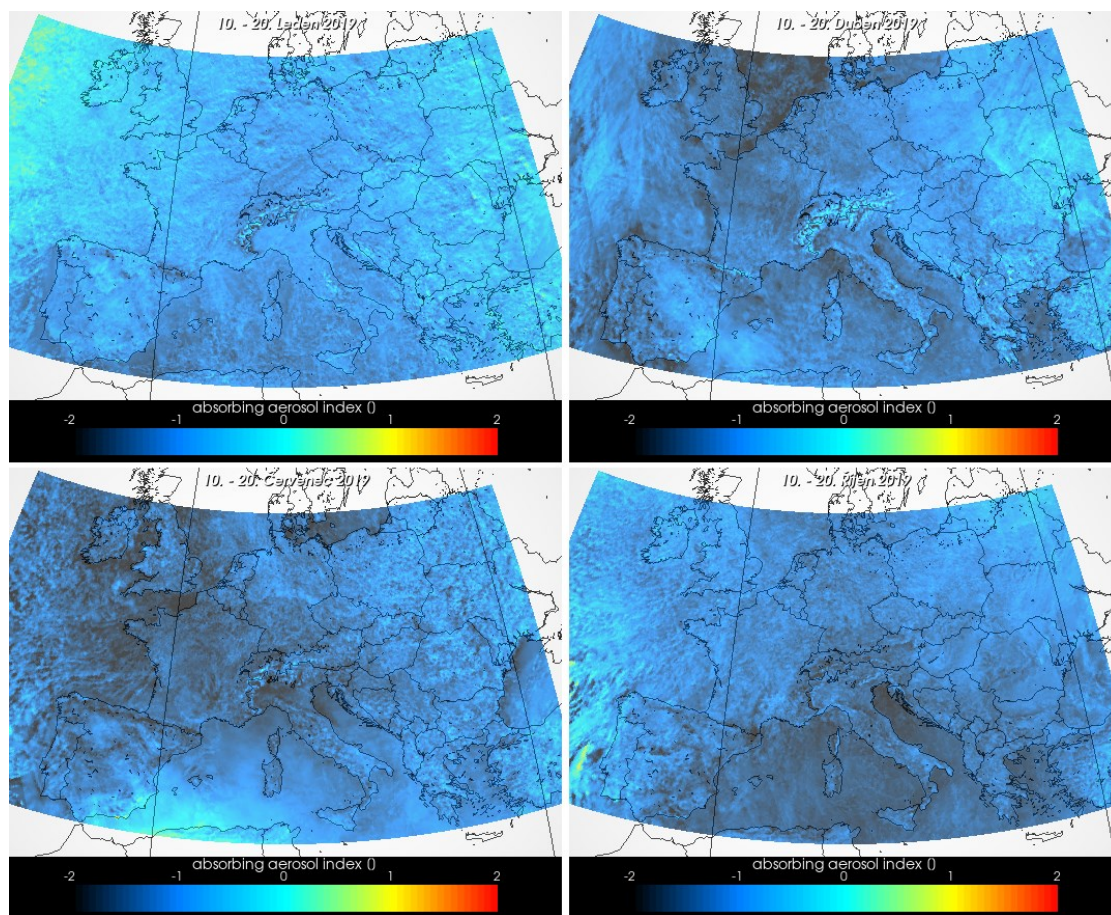
6.5. Formaldehyd HCHO

Na následujícím obrázku jsou vyobrazeny koncentrace formaldehydu nad střední Evropou. Podobně jako u SO_2 je vyfiltrované značné množství pixelů v datech z měsíce ledna.



6.6. Index absorpčního aerosolu

Pomocí indexu absorpčního aerosolu reprezentuje prachové částice v atmosféře. Lze tak sledovat například přesuny sopečného popela, částic pouštního písku nebo kouře z větších lesních požárů. Na nadcházejícím obrázku je vidět index absorpčního aerosolu nad střední Evropou.



7. ZÁVĚR

Družicové technologie se stále rozvíjejí. Rešeršní část ukázala, že vzniklo spoustu publikací, kde byly porovnány různé družicové přístroje pro měření kvality ovzduší. Tyto studie potvrzují, že družice Sentinel-5P vykazuje velmi dobré rozlišení oproti starším snímačům na jiných družicích. Jeho obrovskou výhodou je také denní pokrytí celé planety.

V teoretické části byl popsán princip dálkového průzkumu Země. Čtenář byl také seznámen s problematikou znečištění ovzduší, skleníkovým efektem. Nechybí zde ani informace o jednotlivých polutantech. Práce je zaměřena na družici Sentinel-5P, která patří do programu Copernicus, proto je zde tento program popsán, včetně jednotlivých kategorií poskytovaných služeb. V rámci programu Copernicus se využívá řada dalších družic, které jsou v práci krátce popsány také.

Praktická část byla zaměřena na navržení vhodného postupu pro práci s daty Sentinelu-5P. Je zde vcelku podrobně popsán postup zpracování dat za použití Atmospheric toolbox. Tato část práce může sloužit jako návod na práci v tomto prostředí.

Je známo, že znečištění ovzduší se liší v závislosti na ročním období, protože v různém období panují jiné meteorologické podmínky, které významně ovlivňují rozptyl jednotlivých polutantů. Dalším předmětem praktické části bylo porovnat koncentrace znečišťujících plynů pro vybrané území střední Evropy a území ČR a pohraniční části Polska v jednotlivých ročních obdobích. Bohužel z důvodu špatné kvality dat o koncentracích SO_2 , HCHO a CH_4 v měsíci leden, jsem mohl dále pracovat jen s NO_2 a CO . V případě oxidu dusičitého se potvrdilo větší znečištění v zimním období. U oxidu uhelnatého bylo nejvyšší znečištění na jaře v dubnu.

8. SEZNAM ZKRATEK

AIM – Automatický imisní monitoring

AMF – Air mass factor

AMR-C – Advanced microwave radiometer - C

BEAT – Basic envisat atmospheric toolbox

CO – Oxid uhelnatý

CO₂ – Oxid uhličitý

COVID-19 – Coronavirus disease 2019

CSD Cloud-Snow Differentiation

ČHMÚ – Český hydrometeorologický úřad

ČR – Česká republika

DPZ – Dálkový průzkum Země

EDO – European drought observatory

EFAS – European flood awareness system

EFFIS – European forest fire information system

ENVISAT – Environmental satellite

ERS – European remote sensing

ESA – Evropská vesmírná agentura

EU – Evropská unie

EUMETSAT – European organisation for the exploitation of meteorological satellites

GEM-MACH – Global environmental multi-scale-modelling air quality and chemistry

GEMS – Geostacionary environment monitoring spectrometer

GNSS – Global navigation satellite system

GOME – Global ozone monitoring experiment

GOMOS – Global ozone monitoring by occultation of stars

HCHO – Formaldehyd

CH₄ – Metan

INSPIRE – Infrastructure for spatial information in Europe

ISAI – infrared atmospheric sounding interferometer

MIPAS – Michelson interferometer for passive atmospheric sounding

MIR – Mid infrared

MLS – Microwave limb sounder

NASA – National aeronautics and space administration

NIR – Near infrared

NO₂ – Oxid dusičitý

NOAA – National oceanic and atmospheric administration

NRT – Neat real time

NSO – Netherladns space office

OMI – Ozone monitoring instrument

PM – Particulate matter

REZZO – Registr emisí a zdrojů a znečištění ovzduší

SCIAMACHY – Scanning imaging absorbtion spectro meter for atmospheric
chartograph

TEMPO – Tropospheric emissions: Monitoring pollution

TES – Tropospheric emission spectrometer

TIR – Thermal infrared

TROPOMI – Tropospheric monitoring instrument

UV – Ultra violet

WCRP – World climate research programme

9. SEZNAM OBRÁZKŮ

obrázek 1 - Elektromagnetické spektrum. Zdroj: https://www.cyberphysics.co.uk/topics/radioact/Radio/EMSpectrumcolor.jpg	11
obrázek 2 - zdroj: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/publikace/60let.pdf	25
obrázek 3 - Porovnání družicových senzorů TROPOMI a OMI při měření NO ₂ nad oblasti roponosných písků v Kanadě	29
obrázek 4 - NO ₂ koncentrace nad západní Sibiří. TROPOMI 14. dubna 2019. (https://www.nature.com/articles/s41612-020-01119-z/figures/2).....	30
obrázek 4 - rozhraní https://s5phub.copernicus.eu/	32
obrázek 5 - Browse product (funkce pro prohlížení dat v nástroji VISAN)	33
obrázek 6 - Ukázka použití wplot().....	34
obrázek 7 - Převzorkování na pravidelnou mřížku, převzato z https://rus-copernicus.eu/	35
obrázek 8 - SO ₂ column number density validity určující kvalitu jednotlivých pixelů.	38
obrázek 9 - Průměrné koncentrace NO ₂ pro střední Evropu za 10 dní v měsících leden, duben, červenec a říjen. [Pmolec/cm ²]	39
obrázek 10 - Sloupcový graf koncentrací NO ₂ pro různá roční období ve vybraných státech	40
obrázek 11 - Koncentrace NO ₂ v ČR a části Polska za 10. až 20. leden. [mol/m ²]	42
obrázek 12 - Koncentrace NO ₂ v ČR a části Polska za 10. až 20. duben. [mol/m ²]	42
obrázek 13 - Koncentrace NO ₂ v ČR a části Polska za 10. až 20. červenec. [mol/m ²]	43
obrázek 14 - Koncentrace NO ₂ v ČR a části Polska za 10. až 20. říjen. [mol/m ²]	43
obrázek 15 - Distribuce hodnot NO ₂ pro ČR za 10 dní v měsících leden, duben, červenec a říjen.	44
obrázek 16 - Distribuce hodnot NO ₂ pro Polsko za 10 dní v měsících leden, duben, červenec a říjen.	45
obrázek 17 - Průměrné koncentrace CO [Pmolec/cm ²]	47
obrázek 18 - Sloupcový graf koncentrace CO, pro různá roční období ve vybraných státech	47

obrázek 19 - Průměrné koncentrace SO ₂ [Pmolec/cm ²]	48
obrázek 20 - Průměrné koncentrace CH ₄ [ppbv].....	49

10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

ANDREOVSKÝ, Jan, HENELOVÁ, Vladimíra, ed. Příručka ochrany kvality ovzduší. Praha: Sdružení společností IREAS centrum, 2013. ISBN 978-80-86832-77-7. Dostupné také z: https://mpo.cz/assets/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/aktuality/2016/12/OOO-prirucka_OPLZZ_komplet-20140408.pdf

ArcData: ARCDATA PRAHA. *ArcData: ARCDATA PRAHA* [online]. PRAHA, 2019, 18. 7. 2019 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.arcdata.cz/sluzby-a-podpora-zakazniku/podpora/clanek/conda-a-instalace-vlastnich-balicku-pres-prikazovy-radek-python>

Arnika [online]. Praha, 2014 [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://arnika.org/>

BAUWENS, M., S. COMPERNOLLE, T. STAVRAKOU, a kol. Impact of Coronavirus Outbreak on NO₂ Pollution Assessed Using TROPOMI and OMI Observations. *Geophysical Research Letters* [online]. 2020, 47(11), 9 [cit. 2021-02-11]. ISSN 0094-8276. Dostupné z: doi:10.1029/2020GL087978

BRZEZINA, Jáchym. Rekordně vysoké koncentrace metanu v ovzduší. *CHMI Brno* [online]. 2020, 13. 4. 2020 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://chmibrno.org/blog/2020/04/13/rekordne-vysoke-koncentrace-metanu-v-ovzdusi/>

Copernicus Brochure. In: Copernicus Brochure [online]. 1049 Brussels BELGIUM, 2015, s. 1-15 [cit. 2021-03-10]. ISBN 978-92-79-45666-4. Dostupné z: doi:10.2873/93104

Copernicus: Copernicus Services. Copernicus Services [online]. EU [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.copernicus.eu/en/copernicus-services>

Copernicus: Program Copernicus. Copernicus [online]. Praha: CENIA, 2021, 2021 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://copernicus.gov.cz/index.php/o-copernicu/infrastruktura/kosmicka-komponenta/skupina-druzic-sentinel/>

DOBROVOLNÝ, Petr. *Dálkový průzkum Země; Digitální zpracování obrazu*. Brno: Masarykova univerzita, 1998. ISBN 80-210-1812-7.

DOBROVOLNÝ, Petr. *Dálkový průzkum Země; Digitální zpracování obrazu*. Brno: Masarykova univerzita, 1998. ISBN 80-210-1812-7.

ESKES, Henk, Jos van GEFFEN, Folkert BOERSMA, a kol. Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Nitrogen dioxide. Royal Netherlands Meteorological Institute. Netherlands, 2020. Dostupné také z: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/2474726/Sentinel-5P-Level-2-Product-User-Manual-Nitrogen-Dioxide>

GRIFFIN, Debora, Xiaoyi ZHAO, Chris A. MCLINDEN, a kol. High-Resolution Mapping of Nitrogen Dioxide With TROPOMI: First Results and Validation Over the Canadian Oil Sands. *Geophysical Research Letters* [online]. 2019, 46(2), 1049-1060 [cit. 2021-02-15]. ISSN 0094-8276. Dostupné z: doi:10.1029/2018GL081095

GRIFFIN, Debora, Xiaoyi ZHAO, Chris A. MCLINDEN, a kol. High-Resolution Mapping of Nitrogen Dioxide With TROPOMI: First Results and Validation Over the Canadian Oil Sands. *Geophysical Research Letters* [online]. 2019, 46(2), 1049-1060 [cit. 2021-04-03]. ISSN 0094-8276. Dostupné z: doi:10.1029/2018GL081095

HALOUNOVÁ, Lena a Karel PAVELKA. *Dálkový průzkum Země*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03124-1.

HŮNOVÁ, Iva a Svatava JANOUŠKOVÁ. *Úvod do problematiky znečištění venkovního ovzduší*. Praha: Karolinum, 2004. Učební texty Univerzity Karlovy v Praze. ISBN 80-246-0796-4.

Motyka, K., Mikula, P. 2005: Přehled stanovení formaldehydu a dalších karbonylových sloučenin v ovzduší. *Chem. Listy* 99, 13 - 22; 20 (2005), Referáty. http://chemicke-listy.vscht.cz/docs/full/2005_01_13-20.pdf

OGEN, Yaron. Assessing nitrogen dioxide (NO₂) levels as a contributing factor to coronavirus (COVID-19) fatality. *Science of The Total Environment* [online]. 2020, 726 [cit. 2021-04-17]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138605

Sentinel-5P: The Copernicus Sentinel-5 Precursor mission. <https://sentinels.copernicus.eu/> [online]. 2000-2021, 2000-2021 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p>

SHIKWAMBANA, Lerato, Paidamwoyo MHANGARA a Nkanyiso MBATHA. Trend analysis and first time observations of sulphur dioxide and nitrogen dioxide in South Africa using TROPOMI/Sentinel-5 P data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* [online]. 2020, 91, 13 [cit. 2021-02-12]. ISSN 03032434. Dostupné z:

SINGH, Dharmendra, Meenakshi DAHIYA, Rahul KUMAR a Chintan NANDA. Sensors and systems for air quality assessment monitoring and management: A review. *Journal of Environmental Management* [online]. 2021, 289 [cit. 2021-04-21]. ISSN 03014797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2021.112510

Typy a klasifikace stanic imisního monitoringu: Blog pracovníků Českého hydrometeorologického ústavu pobočky Brno. ČHMÚ Brno: Blog pracovníků Českého hydrometeorologického ústavu pobočky Brno [online]. 25. 11. 2018 [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://chmibrno.org/blog/2018/11/25/typy-stanic-imisniho-monitoringu/>

VAN DER A, R. J., A. T. J. DE LAAT, J. DING a H. J. ESKES. Connecting the dots: NO_x emissions along a West Siberian natural gas pipeline. *Npj Climate and Atmospheric Science* [online]. 2020, 3(1), 7 [cit. 2021-02-12]. ISSN 2397-3722. Dostupné z: doi:10.1038/s41612-020-0119-z

VEEFKIND, J.P., I. ABEN, K. MCMULLAN, a kol. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2012, 120, 70-83 [cit. 2021-02-02]. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2011.09.027

WANG, Chunjiao, Ting WANG, Pucai WANG a Vadim RAKITIN. Comparison and Validation of TROPOMI and OMI NO₂ Observations over China. *Atmosphere* [online]. 2020, 11(6), 19 [cit. 2021-02-12]. ISSN 2073-4433. Dostupné z: doi:10.3390/atmos11060636